



**Tielaitos**

**Laura Apilo**

Tielaitos

TIEL/20

VUONNA 1993 RAKENNETTAVIIN

EMULSIOSORAKOETEIHIN LIIT

29.03.1994 KK 21

Asian tun:1035/93/20/TIEL

Ark=KK Säil=20 Tärk=

Liite 2/2

## **Emulsiopäällystekokeilut 1992-93**

**Tielaitoksen  
selvityksiä**

**79/1993**

Helsinki 1993

**Kehittämiskeskus**

Tielaitoksen selvityksiä  
79/1993

Laura Apilo

## **Emulsiopäällystekokeilut 1992-93**

**Tielaitos**  
Kehittämiskeskus

Helsinki 1993

ISSN 0788-3722  
ISBN 951-47-8138-4  
TIEL 3200203  
Painatuskeskus Oy  
Helsinki 1994

Julkaisun kustannus ja myynti:  
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,  
painotuotemyynti  
Telefax (90) 1487 2652

**Tielaitos**

Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde (90) 148 721

Aiheluokka: 42

Asiasanat: pehmeät päällysteet, emulsiosora, pehmeä asfalttibetoni, bitumiemulsio, koetiet, laboratoriotutkimukset, tutkimusmenetelmät

## Tiivistelmä

Vähäliikenteisten teiden päällysteenä on viime vuosikymmeninä käytetty Suomessa öljysoraa. Öljysoran heikkoutena ovat kuitenkin sen sisältämien liuottimien aiheuttamat hiilivetypäästöt, jotka ovat haitallisia ympäristölle. Kilometristä öljysorapäällystettä haihtuu sen kestoajan aikana 1000 kg liuottimia. Koska Suomi on sitoutunut vähentämään ilmakehään haihtuvien hiilivetypäästöjen määrää 30% vuoteen 1999 mennessä, nähtiin tarpeelliseksi kehittää pehmeä asfalttibetonipäällyste, joka ei sisällä liuottimia.

Vuosina 1992-93 tehtyjen emulsiopäällystekokeilujen tavoitteena oli kahden erilaisen päällysteen kehittäminen. Toisen haluttiin vastaavan ominaisuuksiltaan vähäliikenteisillä teillä käytettävää öljysoraa (ÖS) ja toisen jäykempää hieman vilkkaammin liikennöidyille teille soveltuvaa pehmeää asfalttibetonia (PAB). Työssä on selvitetty materiaalien yhteensopivuutta, emulsiopäällysteille soveltuvia tutkimusmenetelmiä sekä massan valmistukseen ja päällysteen onnistumiseen vaikuttavia seikkoja työmaalla. Tutkimukseen on kuulunut laboratoriokokeita ja mittava koetieohjelma.

Emulsiopäällysteet valmistetaan massa-asemalla. Asemaan kuuluu öljysoran tai asfalttibetonin valmistuksessa käytettävän sekoittimen kaltainen sekoitusyksikkö, johon sideaine lisätään bitumiemulsiona. Emulsion valmistus voi tapahtua asemalla tai emulsio voidaan toimittaa sinne valmiina. Sekoitusasemaan voidaan liittää myös erillinen kiviaineksen lämmitysjärjestelmä.

Kokeilulle asetetut tavoitteet saavutettiin hyvin. Emulsiosora, jonka sideaineena käytetään bitumiemulsiota BE-ES 1000...3000, on pehmeä, karhittavissa ja varastoitavissa oleva päällyste. Emulsiosoran lujouden nopea kasvu vähentää tuoreen päällysteen vaurioitumista. Emulsiosorat voidaan sekoittaa ja levittää kylminä. Jäykemmät emulsiopäällysteet, joissa sideaineena oli BE-PAB 6000, osoittautuivat vaikeiksi työstää kylminä. Kiviaineksen lämmittäminen parantaa oleellisesti PAB:ien työstettävyyttä ja tekee mahdolliseksi jäyempien sideaineiden käytön. Lämmittämistä käytettiin myös valmistettaessa uusiopäällysteitä.

Tutkimuksen yhteydessä etsittiin lisäksi emulsiopäällysteille sopivia tutkimusmenetelmiä esitutkimusten tekemiseen ja kenttälaboratorion käyttöön. Suurimmaksi ongelmaksi osoittautui päällysteen vedenkestävyyden määrittäminen luotettavasti ennakkokokeilla.



## Abstract

In Finland oil gravel pavement has been mainly used on low volume roads. In recent times the environmental risk factor of the volatile solvents in the binder has begun to attract attention. One tonne of solvents is able to volatilize out of one kilometer of new oil gravel pavement. Finland has made an agreement to reduce the amount of volatilizing hydrocarbons by 30% in this decade. Because of that it was necessary to develop a soft asphalt mixture containing no solvents.

Testing of emulsified asphalt pavements done in years 1992-93 had the aim of developing two emulsified asphalt mixtures different in their properties. One of the mixtures was desired to be like oil gravel, the other a bit stiffer and more suitable for minor roads with more traffic. In this research the relationship between different materials, suitability of test methods for emulsified mixes and field circumstances influencing mix and pavement properties have been investigated. In addition to laboratory testing test road building program has played a significant role in the research work.

The production of emulsified asphalt pavements is made in an oil gravel plant, which consists of a batch or continuous mixer and an emulsifying equipment for emulsification of the binder. It is possible to connect an aggregate heater to the mixing plant.

The goals set to the experiment program were reached well. Emulsified mixes made with binder, which viscosity in 60 °C is 1000...3000 mm<sup>2</sup>/s are soft mixes. They can be scarified of the surface throughout their life and used as stockpile mixes. Emulsified mixes reach their final strength in a short time, which makes them less sensitive for early damages. Emulsified binder can be mixed into cold aggregate. Warming is needed when the viscosity of the binder increases up to 6000 mm<sup>2</sup>/s.

Research methods used in mix design both before paving and during paving in the field laboratory were sought. The most difficult problem turned out to be the reliable determination of pavements water sensitivity in advance.

## Alkusanat

Tässä raportissa esitellään Suomessa vuosina 1992-93 tehtyjä emulsiopäällystetutkimuksia. Tutkimuksen käynnisti Tielaitos yhdessä Neste Oy:n kanssa. Koeteiden urakoitsijoina ja laitekehitystyöstä vastaavina ovat olleet Kalottikone Oy vuosina 1992 ja 1993 ja Lemminkäinen Oy vuonna 1993. Teknillisen korkeakoulun tielaboratorio on ollut työssä mukana tutkimuslaitoksena. Kehitystyöhön on kuulunut sekä laboratoriotutkimuksia että laaja koetieohjelma.

Julkaisun on valmistellut työryhmä, johon ovat kuuluneet ins. K. Toikkanen kehittämiskeskuksesta, dipl.ins. K. Hurtig Neste Oy:stä, rkm. H. Ahola Kalottikone Oy:stä, ins. P. Haikarainen Lemminkäinen Oy:stä, ins. H. Karlsson Turun tiepiiristä, ins. E. Laitinen Oulun tiepiiristä, ins. K. Luiro ja rkm. U. Juujärvi Lapin tiepiiristä sekä julkaisun kirjoittaja dipl.ins. L. Apilo TKK:n tielaboratoriosta. Työn aikana on kuultu kehitystyöhön osallistuneita henkilöitä ja koetieohjelman toteuttajia.

Helsingissä, tammikuussa 1994

Tielaitos  
Kehittämiskeskus

## Sisältö

1	JOHDANTO	9
2	TUTKIMUSTYÖN KÄYNNISTÄNYT ONGELMA JA TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	10
2.1	Öljysoran ja pehmeän asfalttibetonin käyttökohteet ja merkittävät toiminnalliset ominaisuudet	10
2.2	Emulsiopäällysteiden ominaisuuksille asetetut tavoitteet	10
	- Emulsiosorat	11
	- Pehmeät emulsioasfalttibetonit	11
	- Uusioemulsiopäällysteet	12
3	ENNAKKOTUTKIMUKSET	13
3.1	Kiviainestutkimukset	13
	- Ominaispinta-ala	13
	- Veden adsorptio	14
	- Mineraalikoostumus	15
3.2	Sideainetutkimukset	16
3.3	Vedenkestävyytutkimukset	17
	- Kenttälaboratorion vedenkestävyytutkimukset	17
	- Vedenkestävyyden tutkiminen ennakoon	17
3.4	Suhteitus	19
	- Emulsiosoran suhteitus	21
	- Pehmeän emulsioasfalttibetonin suhteitus	22
4	KOETEIDEN RAKENTAMISESSA KÄYTETYT TYÖMENETELMÄT JA NIIDEN VAIKUTUKSET MASSAN OMINAISUUksiIN	23
4.1	Massan sekoittaminen jaetusta ja jakamattomasta kiviaineksesta kylmänä	23
4.2	Massan sekoittaminen käyttämällä jakamatonta lämmitettyä tai kylmää kiviainesta	24
4.3	Sekoitusmenetelmän vaikutus massan laatuun	24
	- Peittoasteet	25
	- Massan homogeenisuus	25
	- Massan työstettävyys	26
	- Päällysteen lujuus	27
4.4	Menetelmien kustannusvertailu	27
	- Emulsiosoran kustannukset öljysoraan verrattuina	27
	- Pehmeän emulsioasfalttibetonin kustannukset emulgoimatta tehtäviin pehmeisiin asfalttibeto- neihin verrattuina	28
	- Emulsiomassojen sekoittamisessa käytettyjen menetelmien kustannusvertailu	28

5	KOKEILUSSA TUTKITUT EMULSIOPÄÄLYSTETYYBIT	30
5.1	Emulsiosora ja pehmeä asfalttibetoni	30
	- Sideaineen ja tartukepitoisuuden vaihtelu	30
	- Sekoitustiläpötilän vaihtelu	31
5.2	Uusioemulsiopäälysteet	32
6	PÄÄLYSTEIDEN LAATUVAATIMUKSET JA NIIDEN TÄYTTYMINEN KOKEILUKOHEISSA	33
6.1	Kenttälaboratorion laadunvalvontatutkimukset	33
6.2	Tasaisuus	33
6.3	Tiiviys	34
6.4	Tasalaatuisuus	35
7	KOKEILULLE ASETETTUIEN TAVOITTEIDEN TOTEUTUMINEN	38
7.1	Emulsiosora	38
	- Emulsiosoran stabiliteetin kehittymisen merkitys uudelleenkäyttöön ja varastoitavuuteen	38
	- Emulsiosoran sekoittaminen kylmänä	40
	- Ympäristöystävällisyys	40
7.2	Pehmeä emulsioasfalttibetoni	41
	- Pehmeän emulsioasfalttibetonin sekoittaminen kylmänä	41
	- Ympäristöystävällisyys	43
7.3	Uusioemulsiopäälysteet	43
8	JATKOTUTKIMUKSEN TARVE	44
8.1	Ennakkotutkimusmenetelmien kehittäminen	44
	- Vedenkestävyystutkimukset	44
	- Muut esitutkimukset	45
8.2	Rouheiden kiviainesten esitutkimustarve	45
8.3	Työnaikaiset tutkimusmenetelmät	46
8.4	Koeteiden seuranta	46
	- Tasaisuusmittaukset	47
	- Varastokasat ja karhittavuus	47
	- Veden poistuminen päälysteestä	48
8.5	Pehmeät emulsioasfalttibetonit ja -asfalttibetonit	48
8.6	Emulsion käyttö SIP:ssa ja SOP:ssa	49
9	YHTEENVETO	50
	KIRJALLISUUSLUETTELO	54
	LIITTEET	55



## 1. JOHDANTO

Tässä raportissa esitellään Suomessa vuosina 1992-93 tehtyjä emulsiopäällystetutkimuksia. Tutkimuksen käynnisti Tielaitos yhdessä Neste Oy:n kanssa. Koeteiden urakoitsijoina ja laitekehitystyöstä vastaavina ovat olleet Kalottikone Oy vuosina -92 ja -93 ja Lemminkäinen Oy vuonna -93. Teknillisen korkeakoulun tielaboratorio on ollut työssä mukana tutkimuslaitoksena. Kehitystyöhön on kuulunut sekä laboratoriotutkimuksia että laaja koetieohjelma.

Tutkimuksen teki tarpeelliseksi pyrkimys vähentää ympäristölle haitallisten hiilivety päästöjä aiheuttavien bitumiöljyjen käyttöä ja laskea pehmeiden päällysteiden sekoituslämpötiloja. Tutkimuksen tavoitteiksi asetettiinkin öljysoraa ja pehmeää asfalttibetonia korvaavien emulsiopäällysteiden kehittäminen. Emulsiotekniikassa sideaineen viskositeettia alennetaan emulgoimalla bitumi veteen, joten liuottimien käytöstä voidaan luopua ja sekoituslämpötiloja laskea. Tutkimuksessa on selvitetty sideaineen ja massan valmistukseen vaikuttavia seikkoja sekä kehitetty työn hallitsemiseksi tarpeellisia materiaalien ja massan tutkimiseen sopivia menetelmiä. Keskeistä tietoa ja kokemusta on saatu koeteiltä, joita on rakennettu n. 170 km. Materiaali- ja ympäristömuuttujien lisäksi on kokeilukohteissa päästy vertailemaan massan sekoittamista kahdella eri työmenetelmällä sekä kylmä- ja lämpösekoituksella.

Tässä julkaisussa esitellään uusien päällysteiden, emulsiosoran (ES) ja pehmeän emulsioasfalttibetonin (PAB) toiminnalliset ominaisuudet ja käyttökohteet. Emulsiosora on kylmäsekoitteinen pehmeä päällyste, jota öljysoran tapaan voidaan karhia ja varastoida. Se sopii käytettäväksi vähäliikenteisillä teillä, joiden keskivuorokausiliikenne (KVL) on alle 1500 ajoneuvoa. Pehmeytensä vuoksi se sallii vähäisiä alustan liikkeitä. Hieman jäykempi pehmeä emulsioasfalttibetoni on tarkoitettu käytettäväksi teillä, joilla KVL on alle 2500 ajoneuvoa vuorokaudessa.

Vakiintunut työskentelytapa on edellytyksenä emulsiopäällysteiden laajemmalle käytölle. Tutkimuksen tarkoituksena on siksi ollut myös emulsiopäällysteille soveltuvien laboratorio-, kenttätutkimus- ja työmenetelmien selvittäminen. Tutkimusten tulokset ja jatkotutkimuksen tarve tältä osin on esitetty tässä julkaisussa. Kokeilujen yhteydessä saatu tutkimustieto on arvokasta ja käyttökelpoista myös bitumiemulsioiden muiden päällystetekniikan käyttökohteiden kannalta.

## **2. TUTKIMUSTYÖN KÄYNNISTÄNYT ONGELMA JA TUTKIMUKSEN TAVOITTEET**

### **2.1 Öljysoran ja pehmeän asfalttibetonin käyttökohteet ja merkittävät toiminnalliset ominaisuudet**

Vähäliikenteisten yleisten teiden päällysteenä käytetään Pohjoismaissa eniten öljysoraa, jolla on päällystetty Suomessa noin 23000 tiekilometriä. Öljysora sopii teille, joiden KVL on alle 1000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Sen valmistus on yksinkertaista, sillä sideaine voidaan lisätä kosteaan ja kylmään kiviainekseen. Päällyste säilyy muokattavana vuosia, mikä helpottaa kunnossapitoa ja mahdollistaa öljysoran valmistuksen varastokasaan. Öljysoraa voidaan myös käyttää teillä, joiden kantavuudessa on puutteita, sillä se sallii jonkin verran alustan liikkeitä, esimerkiksi alhaisesta kantavuudesta johtuvat reunahalkeamat korjautuvat osin itsestään. Toisaalta öljysoran säilyminen pehmeänä pitkään on myös ongelma, sillä se rajoittaa öljysoran käyttöä taajamissa ja voi joskus aiheuttaa päällysteen vaurioitumisen.

Toinen vähäliikenteisten teiden asfalttibetonia edullisempi päällystevaihtoehto on pehmeä asfalttibetoni, jolla on päällystetty Suomessa runsaat 5000 kilometriä yleisiä teitä. Pehmeää asfalttibetonia käytetään teillä, joiden KVL on alle 2000 ajoneuvoa vuorokaudessa. PAB:n valmistus vaatii kuitenkin kiviaineksen lämmityksen, joten öljysora-asemaa käytettäessä sen yhteydessä täytyy olla kuivatusrumpu tai höyrykuumennin.

Ympäristönsuojelun merkityksen korostuminen on aiheuttanut keskustelua bitumiöljyjen ympäristövaikutuksista. Bitumiöljyjä sisältävät päällysteet aiheuttavat hiilivetypäästöjä, kun sideaineen liuotin vähitellen haihtuu valmiista päällysteestä. Bitumiöljyissä liuottimen osuus on 5...10%, ja koko Suomen hiilivetypäästöistä n. 2% aiheutuu bitumiöljyistä. Ympäristöarvojen korostumisen myötä on herännyt tarve kehittää pehmeitä kylminä sekoitettavia asfalttibetonipäällysteitä, jotka eivät sisällä ympäristölle haitallisia aineita. Koska Suomi on sitoutunut vähentämään hiilivetypäästöjään 30% vuoteen 1999 mennessä, on tavoite myös kansallisesti merkittävä.

### **2.2 Emulsiopäällysteiden ominaisuuksille asetut tavoitteet**

Emulsiopäällystetutkimukset käynnistyivät keväällä -92. Kokeilujen tavoitteeksi asetettiin tiestön tarpeiden ja käytetyillä pehmeillä päällysteillä tiedostettujen ongelmien perusteella kahden erilaisen päällysteen kehittäminen. Toisen haluttiin vastaavan ominaisuuksiltaan mahdollisimman hyvin



öljysoraa ja toisen pehmeää asfalttibetonia. Vuoden 1993 koeohjelmassa otettiin tavoitteeksi myös öljysora- ja asfalttibetonirouheiden uusiokäytön kehittäminen emulsiolisäsideaineilla.

### 2.2.1 Emulsiosorat

Emulsiosora (ES) on ominaisuuksiltaan öljysoran kaltainen päällyste. Se sopii käytettäväksi vähäliikenteisillä teillä, joiden KVL on alle 1500 ajoneuvoa vuorokaudessa. Emulsiosoralla toivottiin olevan kaikki öljysoran hyvät ominaisuudet, mutta ei sen heikkouksia. Sideaineena käytetään suhteellisen pehmeää bitumia. Kun sideaine ei ole kovin jäykkää, helpottuu massan sekoittaminen, levittäminen ja tiivistäminen kylmänä. Tehdyissä tutkimuksissa on käytetty kolmea viskositeetiltaan erilaista emulsiota BE-ES 1000, 1500 ja 3000. Käytetyn sideaineen viskositeetin mukaan emulsiosorapäällysteitä nimitetään vastaavasti ES 1000, ES 1500 ja ES 3000.

Öljysoraa on valmistettu varastokasoihin, joissa se on säilynyt pitkään levityskelpoisena. Kasassa varastoituja massoja on ollut kätevää käyttää esim. paikkauksissa. Massan varastointimahdollisuus 1...3 kuukaudeksi pidentää Pohjois-Suomessa sekoituskaluston työkauden pituutta runsaalla kuukaudella, sillä levitystyöt voidaan yleensä aloittaa vasta roudan sulamisen jälkeen. Tien kunnossapitäjän kannalta on ollut myös tärkeää, että vanha öljysorapäällyste voidaan kunnostaa karhinnan ja pienen massamäärän lisäyksen avulla. Nämä ominaisuudet, karhittavuus ja varastoitavuus, haluttiin säilyttää emulsiosoralla, ja niiden saavuttaminen on ollut yksi tärkeä tavoite kehitystyössä.

Toisaalta tuoreen öljysoran alhainen stabiliteetti ja lujuuden hidas kasvu ovat olleet ongelmia esim. liittymissä ja taajamissa. Tutkimuksen varsinaisesti käynnistänyt öljysoran merkittävä heikkous on sen aiheuttama ympäristöongelma. Näihin öljysoran puutteisiin haettiin apua emulsiopäällysteistä.

### 2.2.2 Pehmeät emulsioasfalttibetonit

Toisena tutkimus- ja kehityskohteena ovat olleet jäykemmät ominaisuuksiltaan pehmeän asfalttibetonin kaltaiset emulsiopäällysteet. Niiden toivottiin olevan valmistettavissa ilman liuottimia kylmätekniikkaa käyttämällä.

Emulsiosoraan verrattuna pehmeän emulsioasfalttibetonin valmistuksessa käytetään hieman jäykempää pehmeää tiebitumia, jonka viskositeetti on  $3000...16000 \text{ mm}^2/\text{s}$   $60^\circ\text{C}$  lämpötilassa mitattuna. Viskositeetin mukaan emulgoitua sideainetta nimitetään BE-PAB 3000...16000 ja päällysteitä vastaavasti PAB 3000...16000. Massan ES:aa korkeampi lujuus mahdollistaa

sen käytön myös hieman vilkkaammin liikennöidyillä teillä, joilla KVL on alle 2500 ajoneuvoa vuorokaudessa.

### 2.2.3 Uusioemulsiopäällysteet

Uusiomassojen käyttö on lisääntynyt nopeasti kaikkialla maailmassa. Tähän on syynä paitsi pyrkimys säästää raaka-aineita myös tieverkkojen ikääntyminen. Kulutuskerroksen paksuntaminen ei enää tien kantavuuden parantamiseksi ole tarpeellista. Uusiopäällysteiden valmistaminen on vaatinut rouheen kuumentamista, josta on aiheutunut varsinkin asutuksen läheisyydessä ei-toivottavia päästöjä. Rouheiden tarjonnan lisääntyminen on synnyttänyt tarpeen sellaisesta uusiopäällysteen valmistustekniikasta, jossa riittää alhaisempi sekoituslämpötila.

Uusioemulsiopäällysteessä rouheena haluttiin voitavan käyttää sekä ÖS- että AB-rouhetta. Käytettävän rouheen ja lisäsideaineen viskositeetin mukaan uusiopäällyste vastaa ominaisuuksiltaan joko emulsiosoraa, pehmeää emulsioasfalttibetonia tai jopa asfalttibetonia. Kokeiluissa käytetty rouheen määrä vaihteli 48...75% välillä. Rouheen osuus massasta ilmoitetaan lisäämällä päällystemerkin jälkeen kirjaimet RC ja rouheen prosentuaalista osuutta kokonaismassasta ilmaiseva luku. Öljysorarouheen lisäsideaineina uusioemulsiosoran valmistuksessa käytettiin bitumiemulsioita BE-ES 1000, 1500 ja 3000. Jäykempiä uusiopäällysteitä tehtiin käyttämällä BE-PAB 6000 ja BE-PAB 15000 lisäsideaineita ja AB-rouhetta.

Uusiopäällysteille asetettujen tavoitteiden mukaan niiden ominaisuuksien tulee vastata uuden sideaineeltaan samanlaisen päällystemassan ominaisuuksia.

### 3. ENNAKKOTUTKIMUKSET

#### 3.1 Kiviainestutkimukset

Kiviainestutkimusten tarkoituksena on selvittää, mitkä kiviaineksen ominaisuudet vaikuttavat kiviaineksen ja bitumiemulsion yhteensopivuuteen ja mitkä laboratoriokeet soveltuvat näiden ominaisuuksien selvittämiseen. Kun kiviaineksen ja sideaineen vuorovaikutus on selvillä, voidaan bitumiemulsion koostumusta säätämällä parantaa päällysteen ominaisuuksia. Päällysteen onnistumisen kannalta erityisen tärkeää on hallita emulsion murtuminen ja pystyä varmistamaan päällysteen riittävä vedenkestävyys kiviaineskohtaisesti. Kiviainestutkimukset tarjoavat päällystemassalle tehtävien tutkimusten ohella keinon hankkia päällysteen suunnittelussa tarvittavaa tietoa.

Emulsiopäällystekoeteilla kesällä -93 käytetyistä kiviaineksista on selvitetty seuraavassa esiteltävät ominaisuudet. Kiviaineskohtaiset tutkimustulokset ilmenevät koeteistä tehdyistä raporteista /2,5/.

##### 3.1.1 Ominaispinta-ala

Ominaispinta-ala määritellään kivirakeen ulkopinnan alana painoyksikköä kohden, ja sen yksikkönä käytetään  $\text{m}^2/\text{g}$ . Ominaispinta-alaan vaikuttavat kiviaineksen rakeisuus, rakeiden muoto ja niiden pinnan ominaisuudet. Ominaispinta-alaa kasvattaa voimakkaasti rakeiden suuri mikrokarkeus. Ominaispinta-alalla on merkitystä tarttuvuuden, optimisideainepitoisuuden ja massan sekoittuvuuden kannalta.

Kiviainesrakeiden pintojen alaa voidaan mitata erilaisilla adsorptiomenetelmillä. Tässä tutkimuksessa käytettiin typpiadsorptiomenetelmää, jossa rakeiden pinnoille kiinnittyneen typpikaasun määrän avulla saadaan ominaispinta-ala laskettua. Tuloksena saadaan massayksikköä kohden laskettu rakeiden yhteispinta-ala. Ominaispinta-alaa tutkitaan yleensä  $< 0,074$  mm lajitteesta. Hienoaineksen ominaispinta-alaan vaikuttavat sekä rakeiden pintarakenne että hienoaineksen rakeisuus. Jos hienoaineksen ominaispinta-ala on hyvin suuri, hienoaines sisältää todennäköisesti runsaasti siltti- ja savifraktioita. Tällaisen murskeen käyttö päällystekiviaineksena on kyseenalaista. Kun halutaan tutkia ainoastaan rakeiden pinnan karkeutta, käytetään lajitetta  $0,074...0,125$  mm /3/.

Suuri ominaispinta-ala on merkinä yleensä rapautumalla syntyneen hienoaineksen korkeasta määrästä ja kiviaineksen rapautumisherkkyydestä tai ainakin siitä, että raepinnat ovat olleet sään aiheuttamalle kemialliselle ja



fysikaaliselle kulutukselle alttiina. Verrattaessa sora- ja kalliomurskeiden hienoainesten ( $< 0,074$  mm) ominaispinta-aloja havaitaan, että kalliomurskeiden pinta-alat ovat yleensä pienempiä. Soramurskeiden hienoainekset ovat rakeisuudeltaan kalliomurskeiden vastaavaa lajitetta hienompia ja sisältävät pinta-alaa lisääviä rakeiden pinnalle kiteytyneitä saostumia. Kalliomurskeiden rakeet ovat myös terveempiä, pinnoilla ei ole ominaispinta-alaa kasvattavia huokosia. Ominaispinta-alat vaihtelivat soramurskeilla välillä  $4,0 \dots 12,8$  m<sup>2</sup>/g ja kalliomurskeilla  $1,6 \dots 2,7$  m<sup>2</sup>/g. Vertailluista kiviaineksista soramurskeita oli yhdeksän ja kalliomurskeita kolme.

Ominaispinta-ala vaikuttaa sekä bitumin määrälle että laadulle asetettaviin vaatimuksiin. Karkeisiin kiviainesrakeisiin sitoutuu enemmän vettä kuin tasaiseen pintaan. Kiviaines, jonka ominaispinta-ala on suuri eli pinta on karkea, kuivuu sileää raetta hitaammin. Mitä suurempi kiviaineksen ominaispinta-ala on, sitä enemmän myös sideainetta tarvitaan tasaisen kalvon muodostamiseksi kaikkien rakeitten ympärille. Karkeapinta-aisilla rakeilla saavutettu mekaaninen tartunta rakeen ja bitumin välillä on parempi kuin sileillä rakeilla, mikä sekoituksen onnistuessa parantaa päällysteen vedenkestävyyttä.

### 3.1.2 Veden adsorptio

Hydrofiilisyydellä tarkoitetaan kiven kykyä adsorboida eli kiinnittää fysikaalisesti pinnalleen vesimolekyyliä. Hydrofiilinen eli vesihakuinen materiaali kostuu helpommin vedellä kuin öljyllä. Kiviaineksen adsorptiokykyyn vaikuttavat rakeisuus ja ominaispinta-ala.

Adsorptiokokeet tehdään säilyttämällä kiviainesnäytettä avoimessa lasimaljassa eksikaattorissa 100% suhteellisessa kosteudessa, jotta adsorboituva vesimäärä olisi mahdollisimman suuri ja mittausten suhteellinen virhe pieni. Koe tehdään hienoainesnäytteelle, jonka kuivapaino on määritetty kuivaamalla se uunissa. Kokeen tuloksena määritetään vedenadsorptioluku, jolla tarkoitetaan tietyssä ajassa näytteeseen adsorboituneen veden määrää painoprosentteina näytteen kuivapainosta ilmaistuna. Kiviainesnäytteitä säilytetään eksikaattorissa niin kauan, että rakeiden pinnoille ei enää adsorboitunut lisää kosteutta.

Tehtyjen tutkimuksien mukaan ominaispinta-alan ja veden adsorption välillä on kiistaton riippuvaisuus. Tutkituilla kiviaineksilla adsorption ja ominaispinta-alan välinen riippuvaisuus oli 0,83 eli mitä suurempi ominaispinta-ala on, sitä enemmän vettä kiviaines pystyy sitomaan. Kiviaineksen hydrofiilisyyden mittarina käytetty pinta-alayksikköä kohden adsorboituneen veden määrä on esitetty taulukossa 1. Sen voidaan todeta olevan kalliomurskeilla suurempi

kuin soramurskeilla.

*Taulukko 1. Tutkittujen kiviainesten adsorboiman veden määrä pinta-alayksikköä kohden (mg/m<sup>2</sup>)*

KIVIAINES	Ads./Om.p-ala
1. Lukkarinmäki, SrM	5.60
2. Tupuri, SrM	4.20
3. Tupuri, KaM	4.76
4. Rähi, SrM	4.35
5. Kopsanharju, SrM	3.34
6. Ristivuori, SrM	2.83
7. Huiska, KaM	5.28
8. Veskala, SrM	3.16
9. Hailuoto, KaM	9.75
10. Orresokka, SrM	3.08
11. Kulkujoki, SrM	2.95
12. Haapamaa, SrM	3.79

### 3.1.3 Mineraalikoostumus

Kivet koostuvat mineraaleista, jotka ovat useampien alkuaineiden yhdistelmiä. Mineraalikoostumuksella tarkoitetaan kiviaineksen muodostavien mineraalien suhteellisia osuuksia. Yksittäinen kiviainesrae on yleensä usean eri mineraalin muodostama.

Murskeen mineraalikoostumus vaikuttaa sen lujuuteen, iskun- ja kulutuksen-kestävyyteen sekä rapautumisherkkyyteen. Mineraalikoostumus on mielenkiintoinen päälysteen vedenkestävyyttä arvioitaessa, koska sillä on vaikutusta kiviaineksen ja sideaineen väliseen tarttuvuuteen.

Mineraalikoostumus määritettiin röntgendiffraktioanalyysillä, jossa mineraali tunnistetaan kiteen hilatasosta heijastuvan säteen heijastuskulman perusteella. Mineraalin määrää kuvaa heijastuksen voimakkuus, jota verrataan vain yhtä mineraalia sisältävän näytteen heijastuksen intensiteettiin. Menetelmä perustuu Braggin lakiin, jonka mukaan kiteisen aineen atomitasoilta heijastuvat säteet vahvistuvat tietyllä säteen tulokulmalla. Mineraalikoostumus määritetään hienoaineksesta, jossa heijastuvan säteen taittava kiderakenne parhaiten tulee esiin. Mineraalien erilainen lujuus saattaa vaikuttaa kiviainesta murskatessa syntyvien lajitteiden mineraalikoostumuksiin siten, että heikoimmat mineraalit jauhautuvat kovia hienommiksi. Tästä syystä hienoaineksen ja karkeampien lajitteiden mineraalikoostumus ei aina ole sama. Murskatun kiviaineksen mineraalikoostumuksen luotettava selvittäminen edellyttää sekä hienoaineksen että karkeammasta lajitteesta jauhetun näytteen tutkimista /3/.



Tutkitut kiviainekset koostuivat kolmesta tai neljästä päämineraalista, joiden yhteinen osuus on n. 90% mineraaleista. Päämineraaleina olivat kvartsi, plagioklaasi, kalimaasälpä ja sarvivälke sekä biotiitti. Lisäksi monissa kiviainesnäytteissä oli kloriittia. Päämineraalien vaikutus kiviaineksen ominaisuuksiin on hallitseva. Sideaineen tarttumisen kannalta haitallisia ovat maasälpäryhmän mineraalit, etenkin kalimaasälpä, sekä kiilteet ja sarvivälke. Heikkoja tartuntaominaisuuksia voidaan perustella ainakin näiden mineraalien sileällä pintarakenteella, johon bitumi ei pysty mekaanisesti kiinnittymään.

### 3.2 Sideainetutkimukset

Bitumiemulsio valmistetaan sekoittamalla bitumi veteen pieniksi pisaroiksi. Bitumin ja veden lisäksi emulsion valmistuksessa tarvitaan emulgaattoria ja suolahappoa. Tutkimuksissa emulgoitiin kovuudeltaan erilaisia bitumeja, joista pehmeimmän viskositeetti 60 °C:ssa oli 1000 mm<sup>2</sup>/s ja kovimman 15000 mm<sup>2</sup>/s.

Sideaineen reseptiä muuttamalla voidaan vaikuttaa sekä emulsion murtumiseen että päällysteen vedenkestävyyteen. Emulsion valmistuksessa emulsioveden pH-arvo säädettiin suolahapolla välille 1,5...1,7, ja bitumiemulsion lopullinen pH oli n. 2. Valmiudet vesifaasin pH-arvon mittaamiseen tulee olla kenttälaboratoriossa, jos emulgointi tehdään koneaseman yhteydessä. Myös haihdutusjäännöksen määrittäminen vesi-bitumi-suhteen tarkkailemiseksi on tässä tapauksessa tarpeen. Kaikissa käytetyissä emulsioissa vettä oli n. 1/3 ja bitumia n. 2/3 emulsion kokonaispainosta. Tämän tutkimuksen yhteydessä emulsionäytteistä määritettiin laboratoriossa viskositeetti, haihdutusjäännös, haihdutusjäännöksen viskositeetti, laskeuma ja murtuvuus. Koska emulgointi tehdään vasta juuri ennen käyttöä, ei emulsiolta edellytetä varastointikestävyyttä, joten laskeuman määrittäminen on turhaa. Bitumiemulsion viskositeettitiedoista sen sijaan on hyötyä ainakin silloin, kun vesi-bitumi-suhdetta vaihdellaan murtumisajan säätämiseksi.

Neste Oy toimitti kokeilukohteisiin eri koeosuuksia varten viskositeetiltaan erilaiset sideainepohjat emulgoitavaksi koneasemalla. Viskositeetin säätö voidaan tehdä myös koneasemalla sekoittamalla keskenään pehmeää ja kovaa komponenttia sopivassa suhteessa ennen emulgointia. Tällainen menettely on usein järkevää, koska silloin ei tarvitse toimittaa työmaalle useita viskositeetiltaan erilaisia bitumipohjia. Pehmeänä komponenttina käyttökelpoisia ovat joko M-1500 tai ns. fluksi, joka on yleisnimi haihtumattomia hiilivetyjä sisältävälle pehmentimelle (viskositeetti 60 °C:ssa 100...500 mm<sup>2</sup>/s). Tehtyjen tutkimusten yhteydessä olisi kaikki emulsiosorilla käytetyt sideaineet voitu valmistaa pehmentämällä fluksilla pehmeää tiebitumia M-6000 emulgoinnin yhteydessä.



### 3.3 Vedenkestävyystutkimukset

Vedenkestävyydellä tarkoitetaan päällysteen kykyä estää vettä tunkeutumasta kiviaineksen ja sideaineen väliin ja irrottamasta bitumia kiviaineksesta. Alhainen vedenkestävyys aiheuttaa bitumin irtoamisen seurauksena päällysteen purkautumisen. Vesi pääsee tunkeutumaan kiviaineksen ja bitumin väliin, jos kiviainesrakeen peittävä bitumikalvo rikkoutuu. Kiviaineksen hydrofiilinen pinta paljastuu, ja vähitellen vesi irrottaa bitumin koko rakeen pinnalta.

Vedenkestävyyssongelman ratkaiseminen edellyttää kiviaineksen ja bitumin rajapinnalla ilmenevän tartunnan synnyn ymmärtämistä. Tartuntaan eli bitumin kykyyn kiinnittyä kiviainesrakeen pinnalle vaikuttavat seuraavat seikat.

- Kemialliset reaktiot, joissa adsorboituvat bitumin osat reagoivat kiviainespinnan ionien kanssa.
- Mekaaninen kiinnittyminen, joka määräytyy lähinnä kiviaineksen pinnan rakenteen mukaan.
- Pintaenergian muutokset rajapinnalta toiselle siirryttäessä, koska vesi bitumia polaarisempana neutraloi kiviaineksen pinnan ionit tehokkaammin.

#### 3.3.1 Kenttälaboratorion vedenkestävyystutkimukset

Kokeilukohteissa käytettiin emulsiosorien tarttuvuuksien tutkimiseen öljysoran tapaan MYR-koetta. MYR-koe kuvaa lähinnä sideaineen kykyä sitoa hienoainesta. Kokeilukohteissa MYR-tulokset olivat korkeimmillaan lähellä 20 g. Tartukseen ja toisinaan myös sideainepitoisuuden lisäys paransi hienoaineksen sitoutumista niin, ettei sitä MYR-kokeessa irronnut lainkaan. Öljysoralla massan vedenkestävyys on riittävä, kun MYR-arvo on alle 2. Vastaavaa raja-arvoa ei vielä voida asettaa emulsiosorille, mutta saatujen kokemusten perusteella onnistunut lopputulos ei emulsiosorilla edellytä yhtä alhaisia MYR-arvoja kuin öljysoralla.

MYR-kokeen tulokseen vaikuttaa merkittävästi se, kuinka pitkälle emulsion murtuminen on edennyt. Jos murtuminen on vasta alkanut, ei MYR-kokeen tulos kuvaa lopullista tarttuvuutta.

#### 3.3.2 Vedenkestävyyden tutkiminen ennakkoon

Kylminä tai lämpiminä tehtävien päällysteiden vedenkestävyyden tutkimisen mahdollisuus ennen päällysteen tekemistä on tärkeää. Kuumentamaton kiviaines on aina kostea, joten kiviaineksen ja bitumin väliin jää jo massan

sekoitusvaiheessa vettä. Tartuntaa parantavien pinta-aktiivisten aineiden käyttö parantaa tarttuvuutta silloin, kun kiviainesta ei kuumentamalla kuivata. Riittävän vedenkestävyyden takaavan tartukepitoisuuden määrittäminen edellyttää päällysteiden käyttäytymisen kanssa hyvin korreloivia laboratoriotutkimusmenetelmiä.

Laboratoriossa emulsiosorien vedenkestävyyttä yritettiin selvittää märkäsekoituskokein ja jäykempien emulsiopäällysteiden vedenkestävyyttä tarttuvuusluvun avulla. Märkäsekoituskokeessa sideaineen tartukepitoisuutena käytettiin 0,8% ja eri ikäisiä näytteitä otettiin neljä. Näytteiden peittoasteet arvioitiin silmämääräisesti. Tarttuvuusluku määritettiin märän ja kuivan koekappaleen halkaisuvetolujuuksien suhteena.

Märkäsekoituskokeiden tulokset korreloivat huonosti koeteillä tehtyjen tarttuvuushavaintojen kanssa. Tarttuvuutta tai sopivaa tartukkeen määrää ei märkäsekoituskokeilla pystytty ennakkoon määrittämään, vaan sideaineen koostumusta jouduttiin koekohteittain muuttamaan koemassoista saatujen kokemusten perusteella. Kenttälaboratoriossa tehtyjen MYR-kokeiden ja märkäsekoituskokeiden tulosten vertailua vaikeuttaa eri kokeilukohteissa käytettyjen emulsioiden erilaisuus. Lisäksi kenttälaboratorion tuloksiin vaikutti ainakin yhdessä koekohteessa myös rouhe, jonka merkitystä tarttuvuuden kannalta ei laboratoriossa tutkittu lainkaan.

Myöskään kiviaineksen ominaisuuksien ja märkäsekoituskokeen tulosten välille ei ole löydettävissä selkeää yhteyttä. Koska kuitenkin juuri kiviaines oli tärkein muuttuja koekohteesta toiseen siirryttäessä, on sen vaikutus tartuntaan kiistaton. Saatujen kokemusten perusteella märkäsekoituskoe ei sovellu emulsiosoran vedenkestävyyden määrittämisen ennakkotutkimusmenetelmäksi. Emulsiosorien tarttuvuuksien esitutkimusmenetelmäksi on kehitettävä luotettavampi laboratorioke.

Tarttuvuusluku kuvasi kiviaineksen ominaisuuksia märkäsekoituskoetta paremmin. Tarttuvuusluvun suuruus on kääntäen verrannollinen koekappaleeseen imeytyneeseen vesimäärään. Mitä enemmän vettä imeytyy, sitä heikompi on märän kappaleen lujuus. Tarttuvuusluvun ja hydrofiilisyyden (= veden adsorptio / ominaispinta-ala) välille saatiin korrelaatioksi 0,96. Tutkimustulosten vähäisen määrän takia on niiden perusteella vaikea asettaa tarttuvuusluvulle raja-arvoa, jonka alittavilla päällysteillä vedenkestävyys on huono. Tällainen tarttuvuusluvun raja-arvo voisi olla 60%. Kiviaineksen ominaisuuksista ainakin veden adsorptiolla ja ominaispinta-alalla on kuitenkin tulosten mukaan merkitystä vedenkestävyyden kannalta.

Vedenkestävyyskokeet antavat tietoa vain käytettyjen materiaalien yhteensopivuudesta. Mikäli vedenkestävyys osoittautuu kokeessa huonoksi, ei kokeen



perusteella voida arvioida syytä siihen, eikä päätellä, millä keinolla tarttuvuutta olisi mahdollista parantaa. Bitumiemulsioiden käytön yhtenä etuna on mahdollisuus vaikuttaa sideaineen ominaisuuksiin päällystyskohteittain. Bitumiemulsio pitää pystyä suunnittelemaan juuri käytettävälle kiviainekselle sopivaksi eli on tiedettävä, mitkä kiviaineksen ominaisuudet ovat tarttuvuuden kannalta merkityksellisiä. Emulsiopäällysteiden vedenkestävyyttä on tästä syystä pyrittävä selvittämään varsinaisten vedenkestävyysskokeiden lisäksi kiviaineksen ominaisuuksien perusteella.

Parhaiten päällysteissä havaittujen tarttuvuuksien kanssa korreloi vedenadsorptioluvun ja ominaispinta-alan suhde. Kiviaineksen pinta-alayksikköä kohden adsorpoiman veden määrä on sen hydrofiilisyyden mittari. Mitä hydrofiilisempää kiviaines on, sitä huonompi on sen vedenkestävyys, kun kiviaines on kuivaamatonta. Hydrofiilisyyden kasvaessa märkäsekoituskokeissa havaittu peittoaste 60 minuutin ikäisellä näytteellä laski ja MYR-kokeiden tulokset vastaavasti nousivat. Kiviaineksen hydrofiilisuuksia voimakkaasti kasvattavaksi mineraaliksi osoittautui biotiitti, korrelaatio 0,76. Myös veden adsorptiokyky yksinään näkyy tuloksissa vedenkestävyyttä alentavana muuttujana. Märkäsekoituskokeen ja vedenadsorptioluvun väliseksi korrelaatioksi saatiin tutkituille kiviaineksille -0,82.

Saatujen tulosten perusteella mikään mineraali yksinään ei ole vedenkestävyyden kannalta ratkaiseva. Mineraalikoostumuksen vaikutuksen vedenkestävyyteen arvioiminen edellyttäisi kiviainesten kemiallisten koostumusten määrittämistä. Tehdyistä lukuisista tutkimuksista huolimatta kiviaineksen ominaisuuksien vaikutusta emulsiopäällysteiden vedenkestävyyteen ei ole vielä tyydyttävästi selvitetty.

### 3.4 Suhteitus

Suhteituksen tarkoituksena on määritellä päällystemassassa käytettävien materiaalien laadut ja määräosat. Pehmeiden emulsiopäällysteiden suhteitus tehtiin laboratorioissa valmistetuista koekappaleista mitattuihin tilavuussuhdetietojen perusteella.

Suhteituksen kannalta on merkitystä kiviaineksen rakeisuudella ja laadulla. Laadulla ymmärretään sen mineraalikoostumusta, huokoisuutta ym. ominaisuuksia, jotka määräytyvät kiviaineksen syntyhistoriasta. Kiviaineksen laatuun ei yleensä voida vaikuttaa, vaan se määräytyy paikallisten olojen mukaan. Kiviaineksen rakeisuuden valintaan vaikuttaa tavoiteltu päällysteen tyhjätila ja sideainepitoisuus. Kokeilussa kiviaineksina käytettiin öljysoran valmistukseen tarkoitettuja sora- ja kalliomurskeita, jotka oli murskattu öljysoran rakeisuuskäyrän mukaisiksi. Koeteillä tehtyjen havaintojen perusteella käytetty kivi-

aineksen rakeisuuskäyrä soveltuu pehmeille emulsiopäällysteille. Hienoaineksen ja hienojen, alle 0,5 mm, rakeiden osuus ei kuitenkaan saisi olla ohjearvoja suurempi. Suuri hienoaineksen määrä ei sitoudu, vaan aiheuttaa päällysteen pinnan liettymisen. Emulsiosoran ja pehmeän emulsioasfaltti-betonin kiviaineksen rakeisuuden ohjealueet on esitetty liitteissä 1 ja 2.

Bitumiemulsion koostumukseen ja määrään on mahdollista vaikuttaa. Suhteituksen tärkeimpänä tehtävänä onkin optimisideainepitoisuuden määrittäminen. Ennen koeteiden rakentamista tehtiin laboratoriossa koekohteiden kiviainek-sista koekappaleita, joista mitattujen tilavuussuhdetietojen perusteella sideainepitoisuuden optimi määritettiin. Sideaineina käytettiin Neste Oy:n laboratoriossa valmistettuja bitumiemulsioita, joiden lämpötila oli massaa sekoitettaessa +40 °C. Suhteitusta varten koekappaleita tehtiin kolmella eri sideainepitoisuudella siten, että jäävän sideaineen määrää muutettiin aina 0,2%.

Koekappaleet valmistettiin yksitellen, koska oli tärkeää tuntea niiden ainesosat tarkasti. Koekappaleen paino oli 1400 g, ja jokaista koekappaletta varten kiviaines punnittiin seulakohtaisista lajitteista murskausaikaista rakei-suuskäyrää vastaavaksi. Kylminä valmistettavien päällysteiden kiviainekset olivat sekoitettaessa +5 °C ja lämpiminä sekoitettavien n. +50 °C. Kylmä kivi-aines kasteltiin 3% vesipitoisuuteen. Kiviaineksen riittävä kosteus on tärkeää, jotta massa sekoittuu homogeeniseksi.

Kunkin koekappaleen massa sekoitettiin laboratoriossa erikseen erityisesti pienien massojen valmistukseen tarkoitetulla sekoittimella. Koekappaleet puristettiin Marshall-muotissa hydraulisella puristimella staattisesti kuormitta-malla. Kuormana käytettiin 120 kN, kuormitusnopeutena 50 mm/min ja kuormitusaikana 60 s. Koekappaleen tilavuus muotissa mitattiin tilavuussuh-detietojen laskemista varten tarkasti. Koekappaleista lasketaan tilavuus-suhdetiedot kaavoilla 1,2 ja 3:

$$TT = \left( \frac{V_{näyte} - V_{teor}}{V_{näyte}} \right) * 100 \quad (1)$$

$$KAT = \left( \frac{V_{näyte} - V_{kivia}}{V_{näyte}} \right) * 100 \quad (2)$$

$$TA = \left( \frac{V_{bit}}{V_{näyte} - V_{kivia}} \right) * 100 \quad (3)$$

joissa	TT	on	koekappaleen tyhjätila, til-%
	KAT		kiviaineksen tyhjätila, til-%
	TA		täyttöaste, til-%
	$V_{teor}$		koekappaleen teoreettinen tilavuus eli tilavuus ilman tyhjätilaa, $cm^3$
	$V_{näyte}$		koekappaleen mitattu tilavuus, $cm^3$
	$V_{kivia}$		kiviaineksen tilavuus, $cm^3$
	$V_{bit}$		sideaineen tilavuus, $cm^3$

Tuoreen massan täyttöaste on lähes 100% ennen veden poistumista massasta. Päällysteen alkustabiileetin kannalta on tärkeää, että kiviaineksessa oleva vesi ja emulsiosta vapautuva vesi mahtuvat huokostilaan. Täyttöastetta laskettaessa on kuitenkin otettu huomioon vain sideaineen täyttämä tila. Koekappaleista laskettujen tilavuussuhdetietojen perusteella kullekin koetiekiviainekselle määritettiin toivotun täyttöasteen antava sideainepitoisuus.

### 3.4.1 Emulsiosoran suhteitus

Kun kokeiluun ryhdyttiin kesällä -92, asetettiin emulsiosoralla kiviaineksen tyhjätilan täyttöasteen optimiksi 40%. Tämä perustui öljysoran suhteitustutkimuksista saatuihin tuloksiin. Vaikka emulsiopäällysteiden sideaineet eivät sisällä haihtuvia liuottimia, nousee myös emulsiosorien sideaine päällysteen pintaan. Mitä alhaisempi sideaineen viskositeetti on, sitä suurempi on pintaannousuvaara. Pyhtään koetieltä saatujen kokemusten mukaan bitumi nousee helpommin pintaan kylmänä kuin lämpimänä tehdyssä päällysteessä, jossa kiviaines on ollut jakamatonta. Bitumin jakautumisella kiviainesrakeiden pinnalle ja sideainekalvojen paksuudella on siis merkitystä pintaannousun kannalta. Sideaineen alhaisen viskositeetin ja kiviainekseen jakautumisen lisäksi pintaannousuriskiä lisää korkea sideaine- ja vesipitoisuus. Herkimmin sideaine nousee pintaan tuoreessa päällysteessä, josta vesi ei ole vielä ehtinyt poistua. Sideaineen ja veden mahtuminen kiviaineksen tyhjätilaan tulee tarkastaa suhteitusta tehtäessä.

Alkukesällä -93 tehtyjen koetiekatselmusten yhteydessä havaittiin sideaineen pintaannousua muutamissa edellisessä kesänä rakennetuissa koetiekohteissa. Missään päällyste ei ollut sideaineköyhän näköistä. Kokeilumielessä suhteituksella määritettyä ohjearvoa pienemmällä sideainepitoisuudella tehdyt koeosuudet eivät olleet vaurioituneet merkittävästi. Suhteituksessa määritettävää sideaineen optimipitoisuutta päätettiin laskea 37%:iin kiviaineksen

tyhjätilasta. Emulsiosoran hieman öljysoralle sopivaa alhaisemman sideainepitoisuuden selittää se, että valmis ES-päällyste ei sisällä haihtuvia komponentteja. Emulsiosta päällysteeseen jäävä sideainepitoisuus on samalla lopullinen sideainepitoisuus.

Öljysorarouheesta valmistettu uusiopäällyste, jonka lisäsideaineena käytettiin pehmeää emulsiota (BE-ES 1000...3000), suhteitettiin samalla tavalla kuin puhtaasta kiviaineksesta tehdyt emulsiosorat.

### **3.4.2 Pehmeän emulsioasfalttibetonin suhteitus**

Jäykempiä sideaineita käytettäessä sideaineen pintaannosuvaara on vähäinen. Pintaannousua havaittiin kuitenkin, kun massan työstettävyyttä pyrittiin parantamaan runsaalla emulgaattorin käytöllä. Koska kaikilla pehmeillä emulsiopäällysteillä käytettiin kiviaineksena rakeisuudeltaan samankaltaista kiviainesta, pysyi kiviaineksen tyhjätila sideaineesta riippumatta samana. Pehmeällä emulsioasfalttibetonilla optimaaliseksi kiviaineksen tyhjätilan täyttöasteeksi havaittiin 43%.



## 4. KOETEIDEN RAKENTAMISESSA KÄYTETYT TYÖMENETELMÄT JA NIIDEN VAIKUTUKSET MASSAN OMINAISUUKSIIN

Emulsiopäälysteiden valmistus tehdään emulsiomassa-asemalla. Siihen kuuluu sekoitusyksikkö ja sideaineen valmistamiseen tarvittava emulgointiyksikkö. Myös valmista emulsiota on mahdollisuus käyttää. Materiaali- ja ympäristömuuttujien lisäksi kokeiltavina ovat olleet kaksi erilaista työmenetelmää. Toisessa menetelmässä kaikki massat valmistettiin kylmätekniikalla ja toisessa oli mukana kiviaineksen lämmitysjärjestelmä. Sekoitusmenetelmien periaatekuvat ovat liitteinä 3 ja 4.

### 4.1 Massan sekoittaminen jaetusta tai jakamattomasta kiviaineksesta kylmänä

Ensin mainitun työmenetelmän soveltuvuutta emulsiomassojen sekoittamiseen tutkittiin kesällä -93 Etelä-Suomessa Turun, Uudenmaan ja Hämeen tiepiireissä. Menetelmällä tehtiin emulsiopäälysteitä yhteensä n. 48000 tonnia. Urakoitsijana toimi Lemminkäinen Oy, joka oli myös suunnitellut ja rakentanut massan jatkuvatoimisen sekoitusaseman. Sekoitusasemana käytetty VEM 300-asema on valmistunut vuonna -93. Sideaine emulgoitiin koneaseman yhteydessä, emulgointilaitteistona oli Ruotsista Nynäsiltä vuokrattu Scanroadin valmistama SEP IN LINE 12 - emulgointilaitteisto.

Kaikki koemassat tehtiin ilman lämmitystä. Kiviaineksena käytettiin kylmää ja kosteaa kiviainesta, joka oli jaettu 0-6 mm ja 6-16 mm lajitteisiin. Kiviaineksen jakamisen vaikutuksen selvittämiseksi vertailuosuus tehtiin jakamattomasta 0-16 mm soramurskeesta. Koska kiviaines oli jaettua, sideaine voitiin ruiskuttaa erikseen molempiin kiviaineslajitteisiin suurimpienkin rakeiden peittymisen varmistamiseksi. Jaettu kiviaines mahdollisti myös kahden viskositeetiltaan tai murtumisnopeudeltaan erilaisen sideaineen käyttämisen samassa päälystessä. Pehmeämmän sideaineen ruiskuttaminen hienompaan kiviaineslajitteeseen paransi massan työstettävyyttä. Kiviaineksen jakamisesta oli hyötyä siten sekä massan homogeenisuuden että työstettävyyden kannalta.

Kylmätekniikalla ei kokeiltu uusiomassojen valmistamista. Käytettyjen sideainepohjien viskositeetit vaihtelivat 1000...6000 mm<sup>2</sup>/s välillä.

## 4.2 Massan sekoittaminen käyttämällä jakamatonta lämmitettyä tai kylmää kiviainesta

Kalottikone Oy:n urakoimana on kokeiltu menetelmää, jossa sideaine lisätään jakamattomaan kiviainekseen ja kiviaines lämmitetään turbo-menetelmällä 40...50 °C lämpötilaan. Kiviaineksen lämmitystä ei ole välttämätöntä käyttää, ja vertailuosuuksia rakennettiin myös kylminä. Tällä työmenetelmällä pehmeitä emulsiopäällysteitä tehtiin kesällä -92 n. 32000 tonnia ja kesällä -93 n. 53000 tonnia. Annosperiaatteella toimiva massan sekoitusasema MX-45E lämmitysjärjestelmineen samoin kuin emulgointilaitteisto KAEU-25 ovat Kalottikone Oy:n suunnittelemaa ja rakentamia. Bitumiemulsio valmistetaan annoskohtaisesti, mikä mahdollistaa materiaali- ja ympäristömuuttujien ottamisen huomioon tarkasti.

Vastaava sekoitusmenetelmä oli käytössä myös kokeilun ainoassa kohteessa, jossa käytettiin Neste Oy:n emulgoimaa sideainetta. Koetie rakennettiin kesällä -92 Pyhtäälle Kymen tiepiirin omana työnä. Koneasemana käytettiin Kalottikone Oy:n emulsiosora-asemaa MX-30B, johon oli liitetty kiviaineksen lämmitysjärjestelmä.

Menetelmällä tehtyjen emulsiopäällysteiden sideainepohjista pehmeintä oli M-1000 ja jäykintä M-15000. Osa koeosuuksista tehtiin uusiomassoista, joissa rouheena käytettiin ÖS-rouhetta 50...60 % ja AB-rouhetta 48...75 %. Uusiopäällysteitä tehtiin vain lämmitettyinä.

Kun sideaineena käytetään pehmeää tiebitumia M-1000, 1500, 3000 tai 6000, voidaan päällystemassa sekoittaa myös ilman sideaineen emulgointia lämmitämällä kiviaines. Tätä vaihtoehtoa tutkittiin suppeasti kahdessa kokeilukohteessa. Sideaineena käytettiin pehmeää bitumia M-1500. Menetelmä soveltuu käytettäväksi etenkin silloin, kun sideaineen emulgointimahdollisuutta koneaseman yhteydessä ei ole ja emulsion kuljetusmatka on pitkä.

## 4.3 Sekoitusmenetelmän vaikutus massan laatuun

Pehmeiden emulsiopäällysteiden sekoitusasemaksi soveltuu kokeilujen perusteella sekä jatkuvatoiminen että annosasema. Myös kylmäsekoitus ja kiviaineksen lämmittäminen ovat vaihtoehtoisia työmenetelmiä.

Sekoitusmenetelmän lisäksi päällystemassan laatuun vaikuttavat myös ympäristöolot, kuten kiviaineksen ja ilman lämpötila tai kiviaineksen vesipitoisuus. Näiden seikkojen merkitystä voidaan epäsuotuisissa oloissa vähentää sekoittamalla massa lämpimänä. Massan lämmittämisen tarpeellisuus ja siitä



saatava hyöty olisi hyvä voida ratkaista tapauskohtaisesti.

#### 4.3.1 Peittoasteet

Kylmäsekoituksessa oli kiviaineksen jakamisella selkeä vaikutus peittoasteisiin. Jakamatonta kiviainesta käytettäessä suurimmat rakeet jäivät osin paljaksi, ja päälysteen väri oli lämpimänä tai jaetusta kiviaineksesta tehtyyn päälysteeseen verrattuna vaaleampi. Jaetusta kiviaineksesta sekoitetussa massassa sideaine oli jakautunut tasaisemmin koko kiviainekseen. Sideaine ruiskutettiin suurimpienkin kiviainesrakeiden peittymisen varmistamiseksi molempiin lajitteisiin erikseen.

Kylmätekniikalla ei koskaan ole mahdollista saavuttaa 100% peittoastetta. Kiviaineksen varastolämpötilan nousulla 0...5 °C:sta 8...10 °C:een on ASTO-tutkimuksen mukaan vaikutusta kiviainesrakeiden peittymiseen öljysoralla. Kiviaineksen lämpötilan vaikutusta peittoasteisiin kylmätekniikkaa käytettäessä ei tutkittu emulsiopäälysteillä tämän kokeilun yhteydessä.

Lämmittäminen 40...50 °C lämpötilaan parantaa peittymistä selvästi. Kylmäsekoitteisessa pehmeässä asfalttikonkassa hieman alhaisempi peittoasteprosentti poikkeaa eniten totutusta. Kuinka suuri merkitys peittoasteilla on päälysteen kestävyyskannalta, jää nähtäväksi lähivuosina. Luultavaa on, että peittoastetta tärkeämpi massan laadun arvosteluperuste on sen homogeenisuus. Sideaineen ja hienon aineksen muodostama mastiksi on saatava jakautumaan massaan tasaisesti, eikä hienoainespaakkuja saa esiintyä. Tasaisesti massaan jakautunut mastiksi sitoo vajaastikin peittyneet karkeat kiviainesrakeet ja estää niiden irtoamisen päälysteen pinnasta.

Sideainepohjan viskositeetin ja sideainepitoisuuden vaikutuksia peittoasteeseen tutkittiin eri koekohteissa. Eri kohteissa tutkitut peittoasteet eivät kuitenkaan ole vertailukelpoisia keskenään, koska niiden määrittämisessä on käytetty eri menetelmiä. Sideainepitoisuudella on selvä vaikutus peittymiseen, sideaineköyhissä massoissa oli sideaineen viskositeetista riippumatta runsaasti paljaita rakeita. Sideainepohjan viskositeetin merkitys ei ollut yhtä johdonmukainen. Kylminä vaikeasti työstettävien PAB 6000-päälysteiden massa oli tasalaatuista ja hyvin peittynyttä, peittoaste n. 80%, joten sideaineen jäykkyys ei ennen emulsion murtumista vaikuta sekoittumiseen.

#### 4.3.2 Massan homogeenisuus

Tasalaatuisuuden valvontaan kuuluu sekä kiviaineslajittumien että sideaineen kiviainekseen jakautumisen seuraaminen. Massan homogeenisuuteen

vaikuttavat kiviaineksen kosteus ja sekoitusaika.

Suurin osa kylminä tehdyistä massoista sekoitettiin jatkuvatoimisella VEM 300-asemalla, joka oli kesällä -93 ensimmäistä kautta käytössä. Joidenkin kokeilussa tehtyjen massojen peittoasteet jäivät alhaisiksi ja massa oli lajitunutta. Lajittumaongelman poistaminen vaatii koneaseman kehitystyötä, jota tehtiin jo koeteiden rakentamisen aikana. Asemaan tehdyt muutokset paransivat selvästi massan laatua.

Kiviaineksen lämmittäminen parantaa massan homogeenisuutta. Lämpiminä tehdyillä emulsiosora- ja pehmeillä emulsioasfalttibetonimassoilla ei tapahtunut merkittävää lajittumista. Hienoaineksen ja sideaineen muodostamien paakkujen syntyminen ei ollut ongelma missään kokeilukohteessa.

Useimmat päällysteessä ilmenneet lajittumat olivat levitystyön aikana syntyviä keskikonsolidajittumia. Päällysteen lajittumat eivät missään työkohteessa olleet niin pahoja, että ne aiheuttaisivat päällysteen ennenaikaisen purkautumisen.

#### **4.3.3 Massan työstettävyys**

Emulsiosorat ES 1000...3000 olivat helposti työstettäviä sekä kylminä että lämpiminä. Massan sekoittamisessa, levittämisessä tai tiivistämisessä ei ollut ongelmia millään koeosuudella.

Suurimmat erot vertailtavien työmenetelmien välillä ilmenivät, kun sideaineen jäykkyys kasvoi. Kylmätekniikalla massan levitettävyys vaikeutui merkittävästi, kun sideaineen viskositeetti nousi yli 5000 mm<sup>2</sup>/s. Lämpötekniikalla onnistuttiin vielä emulsioilla BE-PAB 6000, jota käytettiin sekä puhtaan kiviainekseen että rouheen kanssa. Massan sekoitus onnistui vielä jäykemmällä sideaineella BE-PAB 15000 ongelmitta, mutta vaikeudet ilmenivät levitystyössä massan murruttua työstettävyys kannalta liian pitkälle. Erityisen ongelmalliseksi tilanne muodostui, kun massan kuljetusetäisyys oli pitkä. Massan työstettävyyden kannalta on tärkeää, että aika massan sekoituksen ja levityksen välillä ei ole liian pitkä (45 min).

Jäykempien emulsiopäällysteiden käyttäminen edellyttää sideaineen murtumisan tarkkaa hallintaa. Murtumisen tapahtuminen pidemmällä aikavälillä, jolloin osa murtumisesta tapahtuu vasta tiivistysvaiheessa, mahdollistaa molemmilla työtekniikoilla jäykempien massojen valmistuksen. Tavoitteena on kylmätekniikalla onnistuminen BE-PAB 6000-sideaineella. Lämpötekniikalla pyritään siihen, että sideaineena voitaisiin käyttää puhtaalla kiviaineksella emulgoitua bitumia B-300 ja uusiomassoissa B-15000.



#### 4.3.4 Päällysteen lujuus

Tutkimuksissa selvitettiin stabiliteetin kasvua erilaisilla pehmeillä emulsiopäällysteillä. Lämmittämällä havaittiin olevan lujuutta kasvattava vaikutus heti päällystämisen jälkeen. Kun päällystämisestä on kulunut kaksi viikkoa, on ero lämmitetystä ja lämmittämättömästä massasta tehtyjen päällysteiden lujuuksien välillä jo selvästi pienentynyt. Lopullisissa lujuuksissa ei havaittu merkittävää eroa samasta sideaineesta ja kiviaineksesta kylmänä ja lämpimänä tehtyjen koeosuuksien välillä.

#### 4.4 Menetelmien kustannusvertailu

Jotta pehmeät emulsiopäällysteet yleistyisivät, täytyy niiden rakentamiskustannusten olla kilpailukykyisiä vastaavien nykyisin käytettävien pehmeiden päällysteiden kanssa. Tarkan kustannusvertailun tekeminen ei vielä ole mahdollista, sillä kokeiluihin liittyy aina tutkimustoiminnasta ja työn ainutlaatuisuudesta johtuvia ylimääräisiä kustannuksia. Pehmeiden emulsiopäällysteiden kustannustaso määräytyy tarkemmin hintakilpailun myötä, kun emulsiopäällysteitä on mahdollisuus käyttää vaihtoehtoisesti ÖS:n tai PAB:n asemesta.

##### 4.4.1 Emulsiosoran kustannukset öljysoraan verrattuina

Emulsiosoran sekoitus- ja levityskalusto on sama kuin öljysoralla. Myös kunnossapitoon soveltuvat samat menetelmät ja välineet molemmille päällysteille.

Kylmänä tai lämpimänä valmistettuun öljysoraan verrattuna vastaavan emulsiosoran hinta poikkeaa merkittävästi ainoastaan sideainekustannuksien osalta. Emulsiotekniikkaa käytettäessä bitumiöljyjen sisältämien liuottimien hinta säästyy, ja emulgoitava bitumipohja on bitumiöljyä huokeampaa. Öljysoran suhteitukseen verrattuna on emulsiosorien tavoitesideainepitoisuus hieman alhaisempi, sillä valmiista päällysteestä ei poistu mitään haihtumalla. Tästä syystä emulsiosoralle riittää sideainepitoisuudeksi n. 0,2 prosenttiyksikköä alhaisempi sideainepitoisuus.

Emulsion valmistamisessa raaka-ainekustannuksia aiheutuu bitumipohjan lisäksi emulgaattorina käytettävästä amiinista, suolahaposta ja vedestä. Lisäksi bitumiemulsion valmistaminen kentällä edellyttää siirrettävän emulgointilaitteiston. Uuden emulgointilaitteiston hinta on 1,5...3 Mmk sen kapasiteetin, laitteiston vaatimien säiliöiden ja valmistajan mukaan. Sideaineen emulgointi koneaseman yhteydessä säästää kuljetuskustannuksia, koska vettä ei tarvitse kuljettaa kaukaa.

Massatonnia kohden sideaineen emulgoinnista aiheutuvia kustannuksia alentaa emulgointilaitteiston kapasiteetin tehokas käyttö. Kun emulgointilaitteiston kapasiteetti on 20 t/h, voidaan yhdellä laitteistolla valmistaa bitumiemulsiota kahden koneaseman käyttöön. Tämä on mahdollista sekä annosperiaatteella toimivalla että jatkuvatoimisella emulgointilaitteistolla. Jos emulsiota valmistetaan useammalla koneasemalla, menetetään kuitenkin mahdollisuus vaikuttaa emulsion koostumukseen tapauskohtaisesti kiviaineksen tai ympäristömuuttujien mukaan. Lisäksi useamman koneaseman tarvitseman sideaineen emulgointi samalla laitteistolla edellyttää varastosäiliötä emulgointilaitteiston toimintaperiaatteesta riippumatta.

Päällysteen korkeampi alkustabiliteetti vähentää sen vaurioitumista tuoreena. Emulsiosoran ES 3000 kestoikä on mahdollisesti öljysoran kestoikää pidempi emulsiopäällysteen jäykkyyden vuoksi, mikä alentaa päällysteen vuosikustannuksia. Käyttökohteen tarpeiden mukaan on emulsiosoraa käytettäessä mahdollisuus valita jäykkyydeltään sopiva päällyste. Emulsiopäällysteiden vuosikustannuksia on mahdollisuus arvioida tarkemmin vasta, kun koeteiltä on saatavissa tietoa päällysteiden kestävyyksistä.

#### **4.4.2 Pehmeän emulsioasfalttibetonin kustannukset emulgoimatta tehtäviin pehmeisiin asfalttibetoneihin verrattuina**

Lämmittämisestä aiheutuvat kustannukset säästyvät silloin, kun öljysoraa jäykempiäkin päällysteitä voidaan emulsioita käyttämällä valmistaa kylmätekniikalla tai emulgointi mahdollistaa ainakin sekoituslämpötilan alentamisen. Kun kiviainesta ei kuumenneta, poistuu pölyongelma ilman kalliita pölynerottimia. Kokeilukohteissa työ onnistui kylmätekniikalla vielä, kun bitumipohjan viskositeetti oli n. 5000 mm<sup>2</sup>/s. Tätä jäykemmät sideaineet vaativat kiviaineksen lämmittämisen.

Bitumin emulgoinnin vaikutus sideainekustannuksiin on emulsiosoralla kuvatun tapainen sideaineen viskositeetista riippumatta.

#### **4.4.3 Emulsiomassojen sekoittamisessa käytettyjen menetelmien kustannusvertailu**

Sideaineen emulgoinnista aiheutuvat kustannukset poikkeavat käytetyissä työmenetelmissä emulsion varastointitarpeen osalta. Kun sideaine emulgoidaan annoskohtaisesti, ei emulsion varastointi ole tarpeen. Toisaalta varastosäiliöt mahdollistavat emulsion valmistamisen samanaikaisesti useammalle koneasemalle, koska säiliöt toimivat puskurina emulsion valmistuksen ja käytön välillä.



Kustannuseroja syntyy myös kiviaineksen erilaisesta käsittelystä. Kylmätekniikkaa käytettäessä kiviaines on jatkuvatoimisella asemalla jaettava kahteen laitteeseen, jotta suurimmatkin kiviainesrakeet peittyisivät bitumilla. Kiviaineksen jakamisesta aiheutuvat lisäkustannukset ovat pienimmät, kun jakaminen tehdään murskaamisen yhteydessä. Tämä puolestaan edellyttää hyvää kiviaineksen käytön suunnittelua.

Jos kiviaines halutaan lämmittää, täytyy sekoitusasemaan liittää kiviaineksen lämmitysjärjestelmä. Kustannuksia aiheutuu lämmitysjärjestelmän hankinnasta ja lämmittämiseen kuluva polttoaineesta.

## 5. KOKEILUSSA TUTKITUT EMULSIOPÄÄLLYSTETYYBIT

### 5.1 Emulsiosora ja pehmeä asfalttibetoni

Tutkimukselle asetettujen tavoitteiden mukaisesti tutkimuskohteina olivat emulsiosorat ja pehmeät emulsioasfalttibetonit. Referenssiosuuksia öljysorasta rakennettiin muutama koekohteeseen. Laajan koetieohjelman ansiosta oli mahdollista tutkia useiden muuttujien vaikutuksia päällysteisiin. Koeteillä tutkittuja muuttujia sekä niiden raja-arvoja ja vaikutuksia päällystemassaan ja valmiiseen päällysteeseen kuvataan seuraavassa koeosuuksien suuren määrän takia vain lyhyesti. Tarkempaa tietoa eri kokeilukohteiden materiaaleista, rakennetuista koeosuuksista sekä työaikaisista oloista ja urakoitsijoiden kokemuksista on koeteistä ilmestyneissä raporteissa /2,5/.

Kiviaineksena kaikissa emulsiosoran ja pehmeän emulsioasfalttibetonin kokeilukohteissa käytettiin 0-16 tai 0-18 mm sora- tai kalliomursketta, joka oli murskattu öljysoran rakeisuuskäyrään.

#### 5.1.1 Sideaineen ja tartukepitoisuuden vaihtelut

Sideaineen jäykkyyden vaikutusten selvittämiseksi massan työstettävyyteen ja valmiin päällysteen ominaisuuksiin valmistettiin kokeilussa jäykkyydeltään erilaisia massoja. Emulsiosoran sideaineina olivat bitumiemulsiot BE-ES 1000, 1500 ja 3000 sekä bitumipohjista M-1000 ja M-6000 yhdistetty bitumiemulsio, jonka tislauksjäännöksen viskositeetti oli  $2381 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Sideainepitoisuutta vaihdeltiin 3,1...3,6% välillä. Pehmeän asfalttibetonin sideaineeksi emulgoitiin pehmeää bitumia M-6000 yksin ja yhdessä bitumien M-1500 ja M-3000 kanssa. Alhaisimmillaan pehmeän asfalttibetonin viskositeetti oli  $3750 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Sideainepitoisuus vaihteli välillä 3,4...4,2%. Lisäksi kokeiltiin vielä jäykemmän pehmeän tiebitumin M-15000 käyttöä emulgoituna. Massoja tehtiin sekä uusiomassoina että puhtaasta kiviaineksesta.

Sideaineen viskositeetilla on merkittävä vaikutus päällysteen ominaisuuksiin, ja käytettävän bitumin kovuus määräytyykin päällysteen käyttötarkoituksen mukaan. Kun emulsiosoraa halutaan valmistaa varastoon, valitaan sideaineeksi BE-ES 1000 tai 1500. Varastomassojen sideainepitoisuutta ei emulsiosorilla korotettu öljysoralla totuttuun tapaan. Pehmeimmät emulsiosorat soveltuvat myös käytettäväksi silloin, kun alustan kantavuus on puutteellinen. Ne ovat helpoimmin karhittavissa, mutta toisaalta herkimpiä deformatumaan ja rikkoutumaan esim. liittymissä. Emulsiosorapäällysteistä jäykin oli ES 3000. Päällysteen jäykkyyden kasvaessa varastoitavuus ja karhittavuus heikkenevät, mutta päällyste kestää paremmin kuormitusta ja kulutusta.

Bitumiemulsion murruttua emulgointivaiheessa siihen lisätty emulgaattori toimii tartukkeena. Riittävän vedenkestävyyden varmistamiseksi emulgoituihin bitumipohjiin oli lisätty tartuketta. Tartuketta lisätään sideainepohjaan tarpeen mukaan, eikä tartukkeen lisääminen aina ole välttämätöntä. Tartukepitoisuutena kokeiluissa käytetyissä bitumipohjissa oli 0...0,6%. Sekä bitumipohjan tartuke että emulgaattori ovat amiineja, mutta eivät välttämättä samaa tuotetta. Tarttuvuuteen vaikutetaan ensisijaisesti bitumipohjaan lisättävän tartukkeen avulla. Emulgaattorin määrä ja laatu, jolla säädellään ensisijaisesti emulsion murtuvuutta, vaikuttaa sideaineen lopulliseen tartukepitoisuuteen. Sideaineen määrästä laskettu bitumipohjaan lisätyn tartukkeen ja emulgaattorin yhteismäärä vaihteli koekohteissa välillä 0,6...1,1%.

Pehmeiden emulsiopäällysteiden tarttuvuus oli useissa työkohteissa aloitettaessa huono. Suurempia ongelmia ilmeni sideaineella BE-ES 1500 kuin BE-ES 3000. Tarttuvuutta parannettiin emulgaattorin määrää lisäämällä niin, että kokonaistartukepitoisuus oli korkeimmillaan 1,2%. Kiviaineskohtaisesti kokeilemalla tarttuvuus saatiin hallintaan.

### 5.1.2 Sekoitustilalämpötilan vaihtelu

Päällystemassan sekoitustilalämpötila vaihteli käytetyn työmenetelmän ja sideaineen viskositeetin mukaan. Kylmäsekoituksessa kiviaineksen lämpötilaan ei vaikuteta lainkaan eli se määräytyy varastokasan lämpötilan perusteella. Kiviaineksen lämpötilan tulee olla yli 5 °C. Sekoituksen aikana lämpötila nousee n. 8 °C. Kiviaines ei saa olla niin kylmää, että on vaara massan jäätymisestä. Päällystyskautta edeltävänä keväänä murskattu kiviaines ei sisällä lunta tai jäätä ja on tästä syystä talven yli varastoitua kiviainesta varmempi valinta.

Lämpösekoituksessa emulsiosorat valmistettiin 40...50 °C ja pehmeät asfaltibetonit 60...75 °C lämpötilassa. Sideaineen ruiskutustilalämpötilana käytettiin kylmäsekoituksessa n. 65 °C ja lämpösekoituksessa n. 80 °C.

Sekoitustilalämpötilalla on vaikutusta massan työstettävyyteen ja kiviaineksen peittoasteisiin. Lämmittäminen parantaa molempia edellä mainittuja massan ominaisuuksia. Kylminä valmistettujen massojen tasalaatuisuuteen vaikutti myönteisesti kiviaineksen jakaminen kahteen lajitteeseen. Tällä ei kuitenkaan ole vaikutusta massojen työstettävyyteen, joka kylmänä sekoitetuilla emulsiopäällysteillä heikkeni sideaineen viskositeetin noustessa yli 5000 mm<sup>2</sup>/s.



## 5.2 Uusioemulsiopäällysteet

Uusioemulsiopäällysteitä tehtiin ainoastaan lämpötekniikalla. Rouheena käytettiin sekä ÖS- että AB-rouheita. Öljysoraruheen osuus massassa vaihteli välillä 50...60% ja asfalttiberuheen välillä 48...75%. Lisäsideaine valittiin massalle halutun jäykkyyden mukaan. Kun käytettiin ÖS-rouhetta, oli lisäsideaineen viskositeetti uusioemulsiosoraa valmistettaessa 1000...3000 mm<sup>2</sup>/s ja pehmeään uusioasfalttiberoniin pyrittäessä 6000 mm<sup>2</sup>/s. AB-rouhetta sisältävän uusiopäällysteen rakeisuuskäyrä suhteitettiin SMA-käyrän muotoon ja lisäsideaineen viskositeetti oli 6000 mm<sup>2</sup>/s tai 15000 mm<sup>2</sup>/s.

Uusioemulsiopäällysteissä käytetyistä rouheista oli tutkittu ainoastaan sideainepitoisuudet. Rouheiden vedenkestävyyttä heikentävä vaikutus tuli yhdes- sä koekohteista yllätyksenä. Tarttuvuutta ei saatu paranemaan edes emulgaattorin kokonaismäärää nostamalla. Vasta korkeampi lisäsideainepitoisuus paransi tartuntaa. Koska rouheessa kiviaineksen peittoaste on jo ennen sideaineen lisäystä korkea, on vaikea arvioida yleisemmin rouheen vaikutusta vedenkestävyyteen.

Koeohjelmaan kuuluneista päällysteistä jäykin oli Kempeleessä tehty uusioasfalttiberoni, jossa käytettiin AB-rouhetta ja lisäsideainetta BE-PAB 15000. Sideainepitoisuuksina kokeiltiin 4,8...5,3%. Työstettävyyttä ei kuitenkaan saatu tyydyttäväksi, joten kokeiluja jatkettiin sideaineella BE-PAB 6000.

Jäykän päällysteen työstettävyyden parantamiseksi vanhaa AB-rouhetta elvytettiin urakoitsijana toimineen Kalottikone Oy:n lisäaineella. AB-rouheen sideaineen tunkeuma oli 70 0,1mm. Uusioasfalttiberonia tehtiin sekä ilman elvytintä että elvyttimen kanssa. Uusiopäällysteistä otetuista näytteistä saatiin sideaineiden tunkeumille seuraavat arvot.

- Päällysteeseen lisätty elvyttävää lisäainetta, tunkeuma 215 0,1mm.
- Päällyste tehty ilman lisäainetta, tunkeuma 185 0,1mm.

Massa valmistettiin kaksivaiheisesti siten, että ensin AB-rouhe käsiteltiin elvyttävällä lisäaineella, jonka jälkeen sekoittimeen lisättiin puhdas kiviaines ja lisäsideaineena käytetty emulsio. Ajomatkan ollessa lyhyt ja ajan sekoituksesta levitykseen alle 45 min oli massan työstettävyyden tyydyttävä, kun levittimessä käytettiin yhdistelmäpalkkia.

Pehmeä emulsioasfalttiberoni, jossa sideaineena oli emulgoitu BE-PAB 6000 puhtaaseen kiviainekseen lisättyä tai ÖS-rouheen kanssa, ei lämpötekniikalla valmistettuna aiheuttanut työtekniisiä ongelmia.

## 6. PÄÄLLYSTEIDEN LAATUVAATIMUKSET JA NIIDEN TÄYTTYMINEN KOKEILUKOhteissa

Pehmeitten emulsiopäällysteiden käyttökohteet ovat samoja, joissa tätä ennen on käytetty öljysoraa tai pehmeää asfalttibetonia. Emulsiopäällysteiden tulee tästä syystä täyttää ominaisuuksiltaan vastaavien ilman sideaineen emulgointia valmistettujen päällysteiden laatuvaatimukset.

### 6.1 Kenttälaboratorion laadunvalvontatutkimukset

Kenttälaboratoriossa massasta otetuista kuormamassanäytteistä määritetään kiviaineksen rakeisuus, sideainepitoisuus, massan vesipitoisuus ja tartunnan varmistamiseksi emulsiosorilla myös MYR-arvo. Nämä tutkimukset palvelevat työn ohjausta. Koekohteissa eniten osoittautui olevan merkitystä tarttuvuuden seurannalla. Työn alussa koemassojen MYR-kokeiden tulosten perusteella emulsion reseptiä muutettiin tarvittaessa.

Ajoradalta otetuista massanäytteistä määritettyjä sideainepitoisuuksia ja rakeisuuksia käytetään arvonmuutosperusteina. Kokeiluissa ei massan epätasalaatuisuus ollut öljysoratoihin verrattuna suurempi ongelma. Öljysorasta poiketen voi emulsiopäällysteiden lopulliseen sideainepitoisuuteen kuitenkin vaikuttaa myös vesi-bitumi-suhteen muuttuminen tavoitellusta. Vesi-bitumi-suhdetta voidaan seurata määrittämällä emulsion haihdutusjäännös.

Osassa kokeilukohteista kenttälaborantin ja valvojan työt oli yhdistetty saman henkilön hoidettaviksi. Kokemusten perusteella päällystysurakassa työmäärä on liian suuri yhdelle henkilölle, ja valvonta kärsii. Tämän kaltaista käytäntöä ei voida suositella.

### 6.2 Tasaisuus

Emulsiopäällysteiden tasaisuusvaatimusten tulee noudattaa pehmeillä päällysteillä käytettyjä vaatimuksia. Emulsiosoralla IRI4-arvon tulee olla alle 1,4 ja pehmeällä emulsioasfalttibetonilla alle 1,2. Poikkeamaindeksille vaatimuksena on ES:lla 9,00 ja PAB:lla 5,00.

Tasaisuuksien arvioimiseksi IRI4-arvot on määritetty useimmista koekohteista, joissa tehtiin pehmeää emulsioasfalttibetonia sekä muutamasta emulsiosorapäällysteestä. Lisäksi on tutkittu tasaisuudet kohteista, joissa käytettiin AB-rouhetta.

Kylminä tehdyillä koeosuuksilla sekä emulsiosoralla että pehmeällä emulsio-asfalttibetonilla IRI4-arvot olivat n. 1,4. Tasaisuusvaatimuksia ei siis aivan saavutettu PAB:lla.

Kiviaineksen lämmittäminen parantaa työstettävyyttä ja helpottaa tasaisuusvaatimusten saavuttamista. Jäykällä uusiopäällysteillä IRI4-arvot kuitenkin nousivat selvästi yli tavoitetason.

Tasaisuusvaatimusten alittumisen syynä oli massan murtuminen liian pitkälle sekoituksen ja levityksen välisenä aikana. Lämpimät massat ehtivät myös jäähtyä kuljetuksen aikana. Uusiopäällysteitä valmistettaessa ongelmia aiheutti lisäksi rouheen holvaantuminen silloihin, mikä osaltaan hidasti massan käsittelyä.

### 6.3 Tiiviys

Emulsiosorien ja pehmeiden emulsioasfalttibetonipäällysteiden tiiviyksiä mitattiin Troxler-laiteella. Mittauksia tehtiin kesällä -93 Lapin ja Oulun tiepiireihin tehdyillä koeosuuksilla sekä Salossa Mt:llä 1835 tieosuudella Kumpula-Kemiö ja Mt:llä 2351 osuudella Halikko-Paimio, joiden mittaustulosten keskiarvot on esitetty taulukossa 2. Tarkoituksena oli tutkia sideaineen viskositeetin vaikutusta päällysteen tiivistettävyyteen saavutettujen tiheyksien avulla ja selvittää päällysteissä toteutuneet täyttöasteet.

Taulukko 2. Salon emulsiosorakoeteiltä mitatut tilavuussuhdetiedot

	TIHEYDET						
	kuiva (kg/m <sup>3</sup> )	märkä (kg/m <sup>3</sup> )	vesi (til-%)	TT (til-%)	SA (til-%)	KAT (til-%)	TA (%)
ÖS	2094	2192	9.8	5.6	7.8	23.2	33.6
ES 1000	2168	2246	7.8	4.3	7.9	20.0	39.5
ES 1500	2191	2254	6.3	4.2	8.0	18.5	43.2
ES 3000	2134	2214	8.0	4.7	7.8	20.5	38.0
EKAB 2/3 3000 ja 1/3 6000	2080	2178	9.8	4.5	8.5	22.8	37.3

Tuloksien hajonta oli melko suuri verrattuna eri osuuksien tiheyksien eroihin, 40...60 kg/m<sup>3</sup>. Gammasäteityksen takaisinsirontaan perustuva Troxler-mittari on alunperin tarkoitettu paksujen kerrosten tiheyksien mittaamiseen. Ohuiden levityskerrosten tiheydenmittauksissa takaisinsirontamittareilla on rajoituksensa, sillä tutkittavan kerroksen paksuutta ei voi asettaa haluamakseen. Ohuiden päällysteiden yleistyttyä on laitteeseen laadittu korjauskaavat alle 84 mm paksuisten päällysteiden tiheyksien selvittämiseksi. Korjauksen tekeminen edellyttää kuitenkin vastaavia tiheysmittauksia ennen päällystämistä.



Osa tutkituista koeosuuksista oli tehty suoraan vanhan öljysoran päälle, mutta paikoitellen oli alustaa tasattu ennen uudelleenpäällystämistä massaa lisäämällä. Alustan erot näkyivät selvästi mittaustuloksissa hajontana. Erilaisten emulsiosoraosuuksien tiheyksien väliset erot kiviaineksen ja sideainepitoisuuden pysyessä vakioina ovat hyvin pieniä. Tiheyden erot aiheutuvat ainoastaan eroista tiivistymisessä.

Troxler-mittauksilla ei päällystämisen jälkeen voida luotettavasti mitata uuden ohuen päällysteen tiheyttä. Tarkka mittaaminen edellyttäisi ainakin vastaavien mittausten tekemistä alustasta ennen päällystämistä. Tehdyssä tutkimuksessa tarkkuutta heikensi osaltaan menetelmälle tyypillinen mittaustulosten hajonta. Päällysteen keskimääräistä tiivistymistä kuvaavan keskiarvotiheyden määrittäminen edellyttää erittäin suurta mittauspisteiden lukumäärää. Menetelmää voidaan ajatella käytettäväksi lähinnä aloitettaessa töitä uudessa päällystyskohteessa. Riittävän aineiston kerääminen ja laitteen käyttövirheiden tuloksissa aiheuttaman hajonnan minimointi edellyttää kokenutta mittajaa, jolla ei ole työmaalla muita tehtäviä.

Uusioasfalttibetonista tyhjätiloja tutkittiin porakappaleista. Tutkittujen näytteiden tyhjätilat olivat yhtä lukuun ottamatta ohjearvoalueella.

## 6.4 Tasalaatuisuus

Päällyste on tasalaatuista, jos siinä ei ole sideaine- tai kiviaineslajittumia eikä sideaineen tai mastiksin pintaannousua. Päällysteen tasalaatuisuus on tärkeää sen kestävyyskannalta, sillä lajittumakohdat ovat herkkiä purkaustumiselle veden päästessä tunkeutumaan avonaiseksi jääneeseen päällysteeseen. Hienoaineksen tai sideaineen runsas määrä päällysteen pinnassa kuluu nopeasti liikenteen vaikutuksesta.

Päällystemassa voi lajittua joko sekoittimessa tai levitettäessä. Mahdollisen lajittuman syntymisen syytä voidaan arvioida kenttälaboratoriossa tutkittujen massakuorma- ja ajoratanäytteiden sekä päällysteessä olevien lajittumien sijainnin perusteella. Kenttälaboratorion tekemien kiviaineksen rakeisuusmääritysten mukaan emulsiopäällystemassoissa ei yleensä ollut pahoja kiviaineslajittumia. Päällystemassoissa toteutuneet rakeisuudet poikkesivat usein huomattavasti kiviaineksen murskausaikaisesta rakeisuuden keskiarvokäyrästä, jota oli käytetty suhteituksen tekemiseen.

Suurimmat kiviaineksen lajittumaongelmat oli Hämeen tiepiirin kokeilukohteissa. Työ tehtiin kylmänä jaetusta kiviaineksesta, ja sideaineina käytettiin emulsioita BE-ES 3000 ja BE-PAB 6000 sekä bitumiöljyä BÖ 2. Sekä massa että valmis päällyste lajittuivat ja peittoasteet jäivät alhaisiksi. Ongelmat olivat

pahimpia öljysoraosuuksilla. Massan laadun parantamiseksi bitumiöljyn tartukepitoisuutta nostettiin 1,3 %:sta 1,5%:iin ja koneasemaan tehtiin sekoitustehoa parantavia ja massan lajittumista vähentäviä muutoksia. Nämä toimenpiteet paransivat lopputulosta. Kiviaineksena kohteessa käytettiin pieneltä yksityiseltä sora-alueelta saatua soramursketta, jota ei ole aiemmin käytetty öljysorakiviaineksena. Kiviaineksen käyttäytymisestä ei tästä syystä ole kokemuksia. Koska samalla koneasemalla oli aikaisemmin kesällä tehty emulsio- ja öljysoratöitä Turun ja Uudenmaan tiepiireissä eikä näissä kohteissa ollut mainittavia lajittumaongelmia, näyttää Hämeen kokeilussa kiviaineksella olleen osaltaan vaikutusta epäonnistumiseen.

Hienoaineksen ja sideaineen muodostamat paakut eivät aiheuttaneet ongelmia missään koekohteista, vaan sideaine jakautui tasaisesti koko kiviainekseen. Yhdessäkään kohteessa ei heti levityksen jälkeen ollut nähtävissä sideainelajittumia. Lajittuminen levitettäessä ei myöskään osoittautunut suureksi ongelmaksi, vaan emulsiosora oli jopa öljysoraa tasalaatuisempaa päälystettä. Samasta kiviaineksesta kylmänä ja lämpimänä tehtyjen koeosuuksien perusteella emulsiopäälysteet olivat kylminä herkempiä lajittumiselle.

Kun kiviaineksen tyhjätila ylitäytyy eli päälysteen tyhjätila jää liian alhaiseksi, ei kaikki sideaineen ja hienoaineksen muodostama mastiksi mahdu huokostilaan. Öljysoralla on totuttu, että tällöin sideaine nousee pintaan lämpimällä säällä liikenteen kuormituksen vaikutuksesta sideaineen viskositeetin alentuessa. Täyttöastetta ja pintaannousuriskiä on vaikea arvioida uudesta päälysteestä. Emulsiopäälysteillä pintaannousua voi tapahtua kuitenkin jo aivan tuoreessa päälysteessä, kun päälysteestä poistuva vesi nostaa sideainetta ja hienoainesta mukanaan pintaan. Koska emulsiopäälysteet eivät sisällä haihtuvia liuottimia, eivät jäykemmät emulsiosorat ja emulsioPAB:t ole öljysoran tavoin herkkiä sideaineen pintaannousulle. Koeosuuksilta saadun tiedon perusteella sideainepitoisuuden vaihtelualue, jolla emulsiopäälyste onnistuu, on suuri. Kokemuksia pehmeimpien emulsiosorien käyttäytymisestä helteisellä säällä ei vielä ole, mikä täytyy ottaa huomioon hyvin pehmeää sideainetta käytettäessä.

Pintaannousuriski tuoreessa päälysteessä kasvaa, kun kiviaines on hyvin märkää. Emulsion murruttua kaikki vesi ei mahdu huokostilaan, vaan pyrkii pois ja nousee varsinkin ajourien kohdalta päälysteen pintaan. Tuore päälyste, jonka stabiliteetti on vielä alhainen, tarttuu ajoneuvojen renkaisiin. Vaurioituminen tapahtuu nopeasti. Jos kiviaines on hyvin kostea, voidaan huokostilan ylitäyttymisen riskiä pienentää käyttämällä nopeammin murtuvaa emulsiota. Kun emulsio murtuu aikaisemmin, poistuu suuri osa vedestä jo massaa kuljetettaessa, ja päälysteen stabiliteetti kasvaa nopeammin. Emulsion murtumisajan säätäminen kiviaineksen vesipitoisuuden mukaan edellyttää

annoskohtaista emulsionvalmistusta.

Märän kiviaineksen aiheuttama sideaineen pintaannousun ongelma havaittiin kesällä -93 muutamassa Etelä-Suomeen kylmänä rakennetussa koekohteessa. Ongelma ilmeni rankkasateen jälkeen rakennetuilla koeosuuksilla, joilla kiviaineksen vesipitoisuus oli 5...6%. Päälyste tummui ajourien kohdalta pian päällystämisen jälkeen ja tarttui ajoneuvojen renkaisiin. Ongelma ratkaistiin hiekoittamalla heti pintaannousun alettua 0-4 mm hiekalla. Hiekoittamisen ansiosta päälysteen tarttuminen renkaisiin loppui, ja muutaman kuukauden ikäisenä päälysteen pinta oli tasoittunut. Ylimääräistä sideainetta ei enää juurikaan ollut havaittavissa. Hiekoittamiseen onkin syytä varautua aina.



## 7. KOKEILULLE ASETETTUJEN TAVOITTEIDEN TOTEUTUMINEN

### 7.1 Emulsiosora

#### 7.1.1 Emulsiosoran stabiiliteetin kehittymisen merkitys uudelleenkäyttöön ja varastoitavuuteen

Monet keskeisistä emulsiosoralle asetetuista tavoitteista liittyvät päällysteen lujuuden kehittymiseen. Emulsiopäällysteiden vanhennustutkimuksella selvitettiin emulsiosorien stabiiliteetin kehittymistä ja lopullisia lujuuksia. Tämä on tärkeä tieto emulsiosoran karhittavuuden arvioimiseksi vuosien kuluttua päällystämisestä. Lisäksi lopulliset lujuudet ovat kiinnostavia, kun selvitetään mahdollisuutta valmistaa emulsiosoraa varastoon. Päällysteiden uudelleenkäyttö edellyttää mahdollisuutta valmistaa uusiopäällysteitä emulsiotekniikalla. Tätä kokeiltiin käyttämällä ÖS-rouhetta emulsiosoran raaka-aineena. Emulsiosoran lujuudella heti sen valmistuttua on puolestaan tärkeä merkitys päällysteen vaurioitumisen kannalta. Vanhennustutkimuksessa haluttiin päällysteen lopullisien lujuuksien ohella selvittää mahdollisuutta vanhentaa pehmeitä päällysteitä laboratoriossa lyhyessä ajassa.

Tutkimuksessa on määritetty laboratoriossa sekoitetuista massoista tehtyjen koekappaleiden halkaisuvetolujuudet 1 vrk ikäisinä ja myöhemmin, kun kappaleita on vanhennettu puhaltamalla niihin + 65 °C lämpöistä ilmaa 14 ja 21 vuorokauden ajan. Tutkitut massat on valittu siten, että niitä vastaavat koetieosuudet on rakennettu kesällä -93. Laboratoriotutkimusten tulokset on esitetty taulukossa 3.

*Taulukko 3. Tuoreiden ja 14 sekä 21 vrk vanhennettujen ES-koekappaleitten halkaisuvetolujuudet*

KIVIAINES	SIDEAINE	HALKAISUVETOLUJUUDET		
		1 vrk	14 vrk vanh.	21 vrk vanh.
Tupuri SrM	BÖ 2 / 3,6%	83	192	198
Tupuri SrM	BE-ES 1000 / 3,6%	68	144	183
Tupuri SrM	BE-ES 1500 / 3,6%	94	276	336
Tupuri SrM	BE-ES 3000 / 3,6%	104	330	423
Lukkarinmäki	2/3 BE-ES 1500 + 1/3 BE-PAB 6000 / 3,4%	106	364	442
Veskala	M-1500 / 3,5%	95	241	
Veskala	BE-ES 1500 / kylmä / 3,5%	125	310	
Veskala	BE-ES 1500 / lämmin /	198	362	
Ref-ÖS	BÖ 2 / 3,5%	50	5 kk 140	loppuluj. 270

Vanhennuslaitteen tehokkuuden selvittämiseksi verrattiin keskenään laboratoriossa keinotekoisesti vanhennettujen ja käyttölämpötilassa UV-säteille alttiina säilytettyjen kappaleitten halkaisuvetolujuuksia. Tarkoituksena oli selvittää minkä ikäistä päälystettä 14 vrk ja 21 vrk vanhennettu koekappale vastaa. Nopeutetulla menettelyllä vanhennettujen massojen tuloksia on verrattu vuonna -92 saatuihin stabiliteettituloksiin, jotka kuvaavat koeteiltä otetuista massanäytteistä mitattuja lujuuksia 1 vrk, 14 vrk ja 150 vrk ikäisinä. Vertailtavina ovat olleet myös talven yli varastokasoissa säilytetyt emulsiosoramassat. Vertailua vaikeuttaa se, että koetiekohteissa on käytetty eri kiviaineksisia vuosina -92 ja -93. Kiviainesten eroista huolimatta ajan vaikutus lujuuden kasvuun emulsiopäälysteillä ilmenee tuloksista selvästi.

*Taulukko 4. Kesällä -92 tehtyjen emulsiopäälysteiden lujuudet*

KIVIAINES	SIDEAINE	HALKAISUVETOLUJUUDET			
		1 vrk	14 vrk	150 vrk	var.kasa
Yläne	BE-ES 1500	67	181	222	207
Yläne	BE-ES 3000 / kylmä	142	291	319	310
Yläne	BE-ES 3000 / lämmin	205	282	314	
Pirttikoski	BE-ES 3000 / kylmä	105	250	362	280
Kotakangas	BE-ES 3000 / lämmin	162	268	360	348

Kaikki vanhennuslaitteessa 14 vrk säilytetyt emulsiopäälysteet ylittivät hieman varastokasoissa tai ilman vanhennusta 150 vrk säilytettyjen sideaineen viskositeetilta vastaavien päälysteiden lujuuden. Kappaleiden vanhentaminen lisää vielä 7 vrk ajan kasvatti lujuuksia 20...25%. Voidaan olettaa, että päälysteen stabiliteetti kasvaa 14 vrk vanhennuksella saavutetun lujuuden jälkeen lähinnä sideaineen hapettumisen vaikutuksesta, ja saatua lujuuden arvoa voidaan pitää tarkasteluissa päälysteen lopullisena lujuutena.

Tutkituista emulsiosorista vain ES 1000:lla jäi sekä alku- että loppustabiliteetti öljysoraa alhaisemmaksi. Koska öljysoran lujuuden kasvu jatkuu vielä, kun se emulsiosoralla on jo pysähtynyt, on ES 1000 lujuudeltaan selvästi öljysoraa heikompi päälyste. Sen käyttö rajoittunee paikkauksiin.

Emulsiosorat ES 1500 ja ES 3000 ovat jo tuoreina öljysoraa jäykempiä. Niiden levittäminen kylmänä onnistui kuitenkin hyvin. Vuoden ikäisinä lujuudet ovat näillä emulsiopäälysteillä 44% ja 72% öljysoralla vastaavan ajan jälkeen mitattua arvoa korkeampia. Kahdeksassa vuodessa öljysora saavuttaa 270 kPa:n lujuuden, joten emulsiosoran ES 1500 stabiliteetti on lähellä tätä arvoa. Se on lopullisen lujuuden saavutettuaan vielä revittävässä ja soveltuu jäykkyytensä puolesta valmistettavaksi varastokasaan. Tutkituista emulsiosorista ES 1500 vastaa lujuusominaisuuksiltaan parhaiten öljysoraa. ES 3000 on hieman jäykempi päälyste, jonka lopulliseksi lujuudeksi tutkimuksissa saatiin 360 kPa. Sen karhittavuuden selvittäminen edellyttää repimisen kokeilua koeteillä.

ES 3000:n levittäminen varastokasasta on todennäköisesti selvästi vaikeampaa kuin ES 1500:n.

Emulsiosorien karhittavuutta selvitettiin myös repimällä niitä henkilöauton perässä vedettävällä revintälaitteella. Tappiterää muistuttavalla revintälaitteella mitattuja revintävastuksia verrattiin eri ikäisillä öljysorilla havaittuihin vastaaviin arvoihin. Koska revintävastukseen vaikuttaa sideaineen viskositeetin lisäksi voimakkaasti päälysteen lämpötila, tarvitaan hankittua laajempi aineisto sideaineen jäykkyydeltä erilaisten emulsiosorien revittävyysarvostelemiseksi tällä menetelmällä. Tehtyjen mittausten perusteella vielä vuoden ikäinen ES 3000 on karhittavissa 25 °C lämpötilassa. Jotta karhinnalla olisi merkitystä, sitä tulisi voida tehdä matalammassa 10...15 °C lämpötilassa.

### 7.1.2 Emulsiosoran sekoittaminen kylmänä

Emulsiosora on öljysoran tapaan sekoitettavissa kylmänä. Kylmäsekoitus onnistui koko emulsiosoran sideaineen viskositeettialueella 1000...3000 mm<sup>2</sup>/s. Kun massa sekoitetaan jatkuvatoimisella sekoitusasemalla kylmänä, kiviaineksen jakaminen parantaa selvästi suurimpien kiviainesrakeitten peittoasteita ja massan homogeenisuutta. Jakamatonta kiviainesta käytettäessä kiviaineksen lämmittäminen n. 40 °C lämpötilaan parantaa massan laatua jakamattomasta kiviaineksesta kylmänä sekoitettuun massaan verrattuna. Lämpimänä tehdyn päälysteen lujuus on uutena korkeampi sideaineeltaan vastaavaan kylmänä tehtyyn päälysteeseen verrattuna (HVL 1 vrk), mutta ero tasoittuu päälysteen vanhetessa (HVL 150 vrk ja vanhenneetut koekappaleet). Molemmilla edellä kuvatuilla työmenetelmillä on mahdollisuus saavuttaa hyvä peittoaste massassa. Vedenkestävyyteen vaikuttaa MYR-kokeiden tulosten perusteella kiviaines ratkaisevasti.

Molemmilla työtekniikoilla onnistuttiin tasalaatuisten emulsiosoramassojen valmistamisessa eikä sideaineen ja hienoaineksen muodostamia paakkuja esiintynyt. Kylmänäkin sekoitettuna emulsiosorat olivat hyvin levittyviä ja tiivistyviä. Saatujen kokemusten perusteella emulsiosora sopii hyvin valmistettavaksi kylmänä. Kylmäsekoitus edellyttää kuitenkin, että kiviaineksen varastolämpötila on yli 5 °C.

### 7.1.3 Ympäristöystävällisyys

Tärkeänä syynä tutkimusten käynnistämiseksi ja emulsiotekniikkaan siirtymiselle ovat olleet ympäristönäkökohdat. Päälysteen aiheuttamat ympäristöhaitat muodostuvat työnaikaisista ja valmiista päälysteestä mahdollisesti haihtuvien komponenttien aiheuttamista päästöistä.



Molempien kokeilussa käytettyjen työmenetelmien työterveysvaikutuksia on tutkittu. Kiviaineksen lämmitysjärjestelmän aiheuttamia päästöjä asfaltin uudelleenkäytön yhteydessä on mitannut Hagforshälsan AB vuonna 1990. Kylmäsekoituksessa syntyviä päästöjä mitattasi Neste Oy kesän -93 kokeilujen yhteydessä.

Kylmänä sekoitetuista emulsiomassasta (sideaineena 1/3 BE-ES 3000 + 2/3 BE-PAB 6000) mitattiin kokonaishiivivedyt, erilaiset PAH-yhdisteet ja liuotinhöyrypitoisuudet. Mittauksia tehtiin sekä levittimen päältä että perämiehen hengitysvyöhykkeeltä. Vertailukohtana oli kylmäsekoitteinen öljysora ja 80 °C lämpötilassa sekoitettu PAB. Kaikki mitatut pitoisuudet olivat erittäin alhaisia. Emulsiomassasta mitatut pitoisuudet olivat alle 0,1% työhygienisistä raja-arvoista ja öljysorallakin vain n. 3% /1/.

Kiviaines lämmitetään johtamalla siihen kuumaa höyryä yhdessä poistokaasujen kanssa. Hiilivetyjen lisäksi lämpimänä sekoitetun uusiopäälysteen aiheuttamista työnaikaisista ilmansaasteista on tutkittu typpioksideja ja häkää. Myös lämpimistä massoista mitatut PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat hyvin alhaisia. Kaikkien muidenkin mitattujen päästöjen pitoisuudet olivat paljon asetettuja raja-arvoja alhaisempia. Käytetyn lämmitysmenetelmän päästöt kuumennusrumpuun verrattuna ovat vähäisemmät eikä pölyämistä tapahdu lainkaan /4/.

Koska emulsiomassassa on vain kiviainesta, bitumia ja vettä, ei valmiista päälysteestä poistu mitään ympäristölle haitallisia aineita.

## **7.2 Pehmeä emulsioasfalttibetoni**

### **7.2.1 Pehmeän emulsioasfalttibetonin sekoittaminen kylmänä**

Pehmeän emulsioasfalttibetonin sekoittamista kylmänä kokeiltiin Turun, Uudenmaan ja Hämeen tiepiireissä. Kokeilussa käytettiin sideainetta BE-PAB 6000 sekä seuraavia sideaineyhdistelmiä:

- 1/3 BE-ES 3000 + 2/3 BE-PAB 6000, lopullinen viskositeetti 4760 mm<sup>2</sup>/s
- 1/3 BE-ES 1500 + 2/3 BE-PAB 6000, lopullinen viskositeetti 3780 mm<sup>2</sup>/s
- 2/3 BE-ES 3000 + 1/3 BE-PAB 6000, lopullinen viskositeetti 3780 mm<sup>2</sup>/s

Kun sideaineena oli pelkkä BE-PAB 6000, ilmeni kylmällä valmistustekniikalla ongelmia. Massa sekoittui homogeeniseksi, mutta murtui niin aikaisin, että massan työstettävyydessä ilmeni ongelmia. Massa oli vaikeasti saatavissa koneaseman varastosiilosta massa-auton lavalle, ja edelleen levitystyö oli

vaivalloista. Jäykkä massa ei levittynyt tasaisesti, ja käsityön osuus levitystyössä kasvoi kohtuuttomasti. Bitumiemulsion murtumisen pitäisi alkaa jo sekoittimessa ja jatkaa kuljetuksen ja levityksen ajan. Liian aikaisin täysin murtunut massa on vaikeata työstää, ja liikkumavara pienenee siirryttäessä jäykempiin sideaineisiin. Jos emulsion murtuminen alkaa liian myöhään, on vaarana sideaineen valuminen pois kiviainesrakeiden pinnoilta. Varsinkin suurien rakeiden pinnalla murtumaton emulsio pysyy huonosti.

Työstettävyydessä ilmenneitä ongelmia yritettiin helpottaa lähinnä emulsion murtumisaikaa säätämällä. Koska molempiin kiviaineslajeihin ruiskutettiin sideaine erikseen, oli mahdollista käyttää kahta ominaisuuksiltaan täysin erilaista sideainetta. Karkeisiin kiviaineksiin ruiskutettavan bitumiemulsion emulgaattoripitoisuutena käytettiin 0,25% ja hienompiin rakeisiin lisättävän sideaineen 0,55%. Tämä pidentäisi murtumisaikaa selvästi, mutta ei parantanut riittävästi työstettävyyttä. Kokeilussa ei tutkittu, miten murtumisajan jatkaminen edelleen vaikuttaisi massan ominaisuuksiin.

Murtumisajan pidentämisen ohella työstettävyyden parantamista kokeiltiin myös lisäämällä massaan silikonია. Kokeilusta luovuttiin kuitenkin pian, sillä massa oli erittäin vaikeaa tiivistää. Toinen pienimuotoinen kokeilu oli vesiliukoisien amiinien lisääminen stabilaattoriksi kiviainekseen.

Kylmänä sekoitettu PAB 6000 osoittautui murtumisajan säädöstä huolimatta vaikeaksi levittää. Työstettävyys parani, kun 1/3 sideaineesta oli bitumiemulsiota BE-ES 3000. Käytetyillä työmenetelmillä kylmätekniikalla onnistumisen raja saavutettiin, kun sideaineen viskositeetti oli n. 5000 mm<sup>2</sup>/s. Vuorokauden ikäisenä tällaisen päällysteen stabiliteetissa PAB 6000:een verrattuna ei juuri ole eroa, ja lopullisissakin lujuuksissa ero jää selvästi alle 10%. Työstettävyyden parantamiseksi voidaan siten käyttää PAB:n sideaineena yhdistelmää 1/3 BE-ES 3000 + 2/3 BE-PAB 6000 tai muuta lopulliselta viskositeetiltaan vastaavaa sideaineyhdistelmää ilman, että päällysteen stabiliteetti laskee merkittävästi. Stabiliteettitutkimusten tulokset on esitetty taulukossa 5.

*Taulukko 5. Tuoreiden ja 14 sekä 21 vrk vanhennettujen PAB-koekappaleitten halkaisuvetolujuudet*

KIVIAINES	SIDEAINE	HALKAISUVETOLUJUUDET		
		1 vrk	14 vrk vanh.	21 vrk vanh.
Lukkarinmäki	1/3 BE-ES 3000 + 2/3 BE-PAB 6000 /	143	669	680
Lukkarinmäki	BE-PAB 6000 / 4,0%	149	718	
Ref-PAB	B-800 / 4,2%	150	700	720



### 7.2.2 Ympäristöystävällisyys

Koska pehmeän asfalttibetonin sideaineena käytetään pehmeää bitumia M-6000, ei tämän päällysteen korvaaminen emulsiopäällysteellä hiilivetypäästöjen vuoksi ole tarpeen. Pehmeitä asfalttibetoneita huomattavasti suurempi ympäristökuormitus aiheutuu öljysorasta.

Emulsiotekniikalla on kuitenkin mahdollisuus säästää ympäristöä myös pehmeiden asfalttibetonien valmistuksessa silloin, kun se mahdollistaa kylmäsekoituksen tai ainakin alhaisemman sekoituslämpötilan käyttämisen. Jotta pehmeiden emulsioasfalttipäällysteiden kylmäsekoitus voisi yleistyä, on jäykän päällystemassan työstettävyyttä pystyttävä parantamaan. Kiviaineksen lämmittäminen 40...50 °C lämpötilaan ei aiheuta pölyämistä. Höyrylämmittintä käytettäessä poistokaasujen johtaminen kiviainekseen vähentää päästöjä.

Työaikaiset päästöt pehmeän emulsioasfalttibetonin valmistuksessa vastaavat kappaleessa 7.1.3 esitetyjä.

### 7.3 Uusioemulsiopäällysteet

Bitumiemulsiot soveltuvat hyvin käytettäviksi rouhemassojen lisäsideaineina. Rumpukuumennusta käytettäessä osa rouheen sisältämästä bitumista palaa, eikä savun leviämistä ympäristöön voida estää. Toimiluvan saaminen tällaisille asemille on vaikeaa. Kun uusiomassa voidaan valmistaa totuttua alhaisemmassa lämpötilassa, säästyy energiaa ja ympäristöhaitat vähenevät. Emulsiotekniikka antaakin mahdollisuuden käyttää rouhe hyväksi asutuksen läheisyydessä.

Tutkimuksen suurimmat loppulujuudet saavutettiin sekä ES- että PAB-uusiomassoilla. Uusiopäällysteiden lopulliset lujuudet ilmenevät taulukosta 6.

*Taulukko 6. Tuoreiden ja 14 vrk vanhennettujen uusiopäällystekoeikkapaleitten halkaisuvetolujuudet*

		HALKAISUVETOLUJUUDET		
KIVIAINES	SIDEAINE	1vrk	14vrk	
Hailuoto	BE-ES 1500 /RC 60 /3,3%	179	499	
Hailuoto	BE-PAB 6000 /RC 60 /4,0%	289	736	
Ref-ÖS	BÖ 2 / 3,5%	50	5 kk	140
Ref-PAB	B-800 / 4,2%	150	700	

Ongelmat uusiopäällystemassojen tekemisessä ovat samat kuin lisättäessä sideaine puhtaaseen kiviainekseen. Kun massan jäykkyys kasvaa, heikkenee sen työstettävyyden.



## 8. JATKOTUTKIMUKSEN TARVE

### 8.1 Ennakkotutkimusmenetelmien kehittäminen

Koska pehmeät emulsiopäällysteet eivät ole yleisesti käytössä missään maassa, ei niiden suunnitteluun tai ominaisuuksien tutkimiseen ole vakiintuneita tutkimusmenetelmiä. Ulkomaisessa kirjallisuudessa emulsiopäällysteille esitetyt laboratoriotutkimusmenetelmät ovat alkuaan AB-päällysteitä varten suunniteltuja, ja niitä on kehitetty siten, että ne soveltuvat käytettäväksi jäykkyydeltään asfalttibetoneja vastaaville emulsiopäällysteille. Kokeilujen yhteydessä tutkittiin öljysoralle käytettyjen laboratoriotutkimusmenetelmien soveltuvuutta emulsiosorille ja pyrittiin kehittämään emulsiopäällysteille soveltuvaa luotettavaa tutkimuskäytäntöä.

#### 8.1.1 Vedenkestävyystutkimukset

Suurimpana ongelmana oli päällysteen vedenkestävyyden ennakoiminen. Kiviaineksen ja sideaineen välistä tarttuvuutta voidaan parantaa kasvattamalla sideainepohjassa olevan tartukkeen tai emulgaattorin määrää. Jotta kiviaineksen vaatima tartukepitoisuus voitaisiin selvittää ennen emulsion valmistamista ja tällä tavalla valita bitumipohjalle sopiva tartukepitoisuus, tulee vedenkestävyyttä voida ennustaa laboratoriotutkimuksin.

Vedenkestävyyden ongelman ratkaiseminen edellyttää kiviaineksen ja sideaineen väliseen tartuntaan vaikuttavien muuttujien selvittämistä. Tähän mennessä tehtyjä kiviaineskokeita täytyy laajentaa niiden kiviaineksen ominaisuuksien määrittämiseksi, joilla on vaikutusta tartuntaan. Selvittämättä ovat vielä kiviaineksen alkuainekoostumuksen, pinnan happamuuden ja pintapotentialin merkitykset sideaineen tarttumiseen kiviainesrakeitten pinnalle.

Kun otetaan käyttöön uusi kiviaines, josta emulsiopäällystettä ei aikaisemmin ole valmistettu, halutaan sen vedenkestävyys selvittää. Tähän tarkoitukseen käytettävän kokeen tulee olla nopea, helppo tehdä ja kustannuksiltaan alhainen. Kiviaineksen ominaisuuksien selvittäminen kovin laajasti ei ole mielekästä.

Käytettävältä vedenkestävyyskokeelta edellytetään, että sen tulosten täytyy korreloida hyvin koeteillä tehtyjen havaintojen kanssa. Tällaisen vedenkestävyyskokeen kehittäminen jo seuraavaan päällystyskauteen mennessä on tärkeää. Uusimpana hyviä tuloksia antaneena vedenkestävyyskokeena on SHRP-tutkimuksien yhteydessä Auburnin yliopistossa kehitetty Net Adsorption-menetelmä. Se on kaksivaiheinen koe, jolla mitataan sekä kiviaineksen ja

sideaineen adheesiota että vedenkestävyysominaisuuksia. Menetelmää ei ole vielä kokeiltu bitumiemulsioille, mutta muilla bitumisilla sideaineilla saatujen hyvien kokemusten perusteella sen sopivuutta emulsiomassoille kannattaisi tutkia.

Tehdyissä kokeiluissa tartuntaan yritettiin vaikuttaa ainoastaan sideaineen koostumusta muuttamalla. Kokeilematta jäi vaihtoehto, jossa kiviaineksen tartuntaan vaikuttavia ominaisuuksia muutetaan. Tämä on mahdollista käsittelemällä kiviaines pinta-aktiivisella aineella, joka toimii samoin kuin tartuke.

### **8.1.2 Muut esitutkimukset**

Vedenkestävyystudkimusten lisäksi tehtiin kaikkiin kokeilukohteisiin laboratoriossa suhteitus ja selvitettiin päälysteiden alkustabiilitteetti. Ennakkosuhteitusmenetelmä perustuu koekappaleesta mitattuihin tilavuussuhdetietoihin. Sideainepitoisuuden ohjearvona käytettiin -93 edellisenä kesänä saatujen kokemusten perusteella emulsiosorilla 37% ja emulsiokevytasfalttibetonilla 42%. Sopiva täyttöaste tarkentuu, kun koeteiltä saadaan lisää kokemuksia päälysteiden kestävydestä ja mahdollisesta sideaineen pintaannoususta. Suhteitusmenettely edellyttää koekappaleitten valmistamista, joten halkaisuveltojuuden mittaamisesta ei aiheudu mainittavaa lisätyötä. Alhainen alkustabiilitteetti ei pehmeillä emulsiopäälysteillä kuitenkaan ole ongelma, joten sen määrittäminen ei ole välttämätöntä.

### **8.2 Rouheiden kiviainesten esitutkimustarve**

Vedenkestävyyttä koskevien ennakkokokeitten heikko korrelaatio koeteiltä saatujen tulosten kanssa johtui osittain siitä, että rouheiden kiviaineksia ei ollut tutkittu lainkaan. Rouheissa kiviaineksen peittoaste on korkea, mikä toisaalta vähentää rouheen merkitystä vedenkestävyyden kannalta. Kun uusiopäälysteessä useimmiten vain alle puolet kiviaineksesta on puhdasta, on rouheen kiviaineksen merkitys massan ominaisuuksien kannalta kiistaton. Koekohteissa rouheista määritettiin ainoastaan sideainepitoisuudet uuttamalla.

Tarttuvuuden varmistamiseksi rouheiden kiviaineksille tulee tehdä samat vedenkestävyystudkimukset kuin puhtaalle kiviainekselle. Kiviaineksen pinnan ominaisuuksien tutkimuksissa kiviaineksena voidaan käyttää uuttosuodatuksesta saatavaa kiviainesta.

### 8.3 Työnaikaiset tutkimusmenetelmät

Kenttälaboratorion tehtävänä on tuottaa tietoa työmaan ohjaukseen määrittämällä massakuormanäytteistä kiviaineksen rakeisuus, sideaine- ja vesipitoisuudet sekä emulsiosoraa valmistettaessa myös päällysteen vedenkestävyys MYR-kokein. Lopullista päällysteen laatua arvostellaan ajoratanäytteistä määritettyjen rakeisuuksien ja sideainepitoisuuksien perusteella.

Sideainetta ei toistaiseksi kenttälaboratoriossa ole tutkittu lainkaan tai siitä on määritetty vesi-bitumi-suhde haihuttamalla. Kun sideaineen ominaisuuksia muutetaan kiviainekohtaisesti, on tärkeää kyetä tutkimaan kenttälaboratoriossa myös joitain sideaineen ominaisuuksia. Kenttälaboratoriossa käytettävien kokeiden tulee olla yksinkertaisia ja nopeita eikä niiden tekemiseen tarvittavien laitteiden hankintahinta saa olla korkea. Sideaineen koostumuksen ja ominaisuuksien tarkkailemiseen työmaalaboratoriossa soveltuisivat seuraavat emulsion tutkimusmenetelmät:

- haihdutusjäännös
- viskositeetti
- murtuvuusindeksi
- seulonta
- pH-arvo vesifaasista ja/tai emulsiosta

Öljysoran vedenkestävyyden arvostelussa käytetty MYR-koe ei aivan sellaisenaan ole sopiva emulsiosorilla käytettäväksi, vaan se kaipaa tarkennusta. Koe tulisi tehdä murtuneesta massasta, sillä murtumaton emulsio huuhtoutuu pois kiviaineksen pinnasta, ja kokeen tulos ei kuvaa lopullista tarttuvuutta. Koska emulsioiden murtumisaikoja säädetään kiviainekohtaisesti, on vaikeaa antaa täsmällistä ohjetta siitä, milloin näyte MYR-koetta varten tulisi ottaa. Jos kenttälaboratoriossa tutkitaan sideaineen murtumista, voidaan MYR-kokeessa käytettävän näytteen ikä sitoa murtumisindeksin tulokseen. Jotta vedenkestävyyskokeen tulosta olisi mahdollista käyttää työn ohjaukseen, tarvitaan tulos kuitenkin mahdollisimman pian massan valmistuksen jälkeen.

### 8.4 Koeteiden seuranta

Jotta kaikki koeteiltä saatavissa oleva tieto tulee kerätyksi talteen, pyritään koeteitä seuraamaan järjestelmällisesti vähintään kaksi vuotta rakentamisen jälkeen. Koeteiden seurantatöistä vastaavat tiepiirit.



#### 8.4.1 Tasaisuusmittaukset

Tasaisuusmittauksien tekeminen emulsiosorateilta ei ole välttämätöntä, koska päällystettä käytetään vähäliikenteisillä teillä, joilla tasaisuusvaatimukset ovat matalat. Sideaineen pehmeiden vuoksi emulsiosorat osoittautuivat myös helposti työstettäviksi, eikä päällysteen epätasaisuus ole niillä ongelma.

Pehmeiden emulsioasfalttibetonien vaikeamman työstettävyyden vuoksi niiden pinta jää epätasaiseksi. Vaatimustaso on emulsiosorateita korkeampien liikennemäärien vuoksi tiukempi. Tasaisuudet on syytä mitata päällysteistä, joiden sideaineena käytetyn bitumipohjan viskositeetti on yli 4000 mm<sup>2</sup>/s. Tavoitteena on saada vuonna 1994 myös kovempien PAB:en ja uusioPAB:en tasaisuudet vaatimusten mukaisiksi.

#### 8.4.2 Varastokasat ja karhittavuus

Varastokasaan valmistettuja emulsiosoramassoja on tarkoitus käyttää paikkausmassoina. Niiden on oltava riittävän pehmeitä, jotta niiden työstäminen on mahdollista. Varastokasaan valmistetuista massoista selvitetään laboratoriokeuin halkaisuvetolujuudet vuoden ja kahden vuoden ikäisinä. Tutkimukset tehdään massoille, joiden sideaineena on käytetty viskositeeteiltaan erilaisia bitumiemulsioita BE-ES 1000...3000. Tuloksia verrataan iäkkäästä öljysorasta tutkittuihin arvoihin.

Lisäksi massojen työstettävyyttä tutkitaan käyttämällä niitä öljysoran tapaan paikkausmassoina. Varastoon tehtyjen massojen määrän vähyydestä huolimatta tulee kokeilla myös niiden levittämistä asfaltinlevittimellä. Jotta emulsiosoralle asetettu tavoite olisi saavutettu, pitäisi massan olla käsiteltävissä öljysoran työmenetelmin ja lopputuloksen öljysoralla tehtyä paikkausta vastaava.

Pidemmän ajan stabiiliteettia selvittävät tutkimukset ovat tähänneet lähinnä viskositeeteiltaan erilaisten sideaineiden käyttörajojen löytämiseen. Jatkotutkimuksen tarvetta on vielä ES 3000:lla, jonka karhittavuutta täytyy tutkia tarkemmin kesällä -94. Jotta koetiet säilyvät mahdollisimman hyvässä kunnossa, kannattaa työ tehdä pääosin TKK:n revintävastusta mittaavalla laitteella. Yhdessä koekohteessa karhinta tappiterällä tai lautasrepijällä on kuitenkin suotavaa. Vertailukohtana käytetään öljysoraa ja pehmeimpiä emulsiosorapäällysteitä ES 1000 ja ES 1500. Revittävyden rajan löytämiseksi tutkimuksessa revitään päällysteitä eri lämpötiloissa.

### 8.4.3 Veden poistuminen päällysteestä

Emulsion murtuessa vapautuu runsaasti vettä. Tuoreen massan vesipitoisuus dekksi on kokeilukohteissa korkeimmillaan mitattu 5...6%. Jos päällyste tehdään myöhään syksyllä eikä vesi ehdi poistua siitä ennen pakkasia, voi jäätyvä vesi laajetessaan vaurioittaa päällystettä. Jotta myöhemmin mahdollinen päällystysajankohta osataan arvioida, täytyy päällysteen kuivamisnopeus tuntea. Kahden vuoden ikäisen emulsiosoran vesipitoisuuden on todettu olevan n. 0,5%. Päällysteen vesipitoisuus tutkitaan koko päällystekerroksesta otetusta näytteestä kuivaamalla.

Lapin tiepiiriin kesällä -93 tehtyjen koepäällysteiden kosteuksia tutkittiin, kun päällystämisestä oli kulunut 31...81 vuorokautta. Päällysteiden vesipitoisuudet vaihtelivat välillä 1,07...2,22%. Tutkimuksessa oli mukana sekä lämpimiä että kylmiä öljysora- ja emulsiosoraosuuksia. Kiviaineksen kosteus varastokasassa ennen massan sekoittamista tunnetaan kaikissa kohteissa. Tutkituista muuttujista parhaiten päällysteestä mitattua vesipitoisuutta selittävät aika ja sideaine (emulsio tai bitumiöljy).

Tarkoituksena on edellä mainittujen muuttujien lisäksi selvittää alustan vaikutusta veden poistumiseen päällysteestä. Tehdyissä tutkimuksissa oli lyhimilläänkin kulunut kuukausi päällystämisestä ja kosteusmittauksen välillä. Veden poistumisnopeuden selvittämiseksi on päällysteen kosteus mitattava pian päällystämisestä jälkeen. Vesipitoisuutta tulee mitata päällysteestä 2 vrk, 1 vk, 2 vk ja kuukausi sen valmistumisen jälkeen. Mittauksia tehdään sitomattomalle ja karhitulle alustalle tehdyille sekä AB-päällysteen päälle liimatuille päällysteille. Viimeksi mainitussa tapauksessa tiiviin alustan merkitystä voidaan selvittää määrittämällä vesipitoisuus myös erikseen päällysteen ylä- ja alaosaan. Koska ilmankosteudella on merkitystä veden haihtumiseen, olisi päällysteen kuivamista hyvä seurata sekä alku- että loppukesästä tehdyistä päällysteistä.

### 8.5 Pehmeät emulsioasfalttibetonit ja -asfalttibetonit

Kokeiluissa öljysoraa korvaavien emulsiopäällysteiden valmistaminen onnistui hyvin. Ongelmia oli kylmätekniikkaa käytettäessä, kun sideaineen viskositeetti oli  $> 5000 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Lämpiminä tehdyt PAB 6000 päällysteet onnistuivat hyvin. Emulsiotekniikan käyttömahdollisuuden laajentaminen edellyttää työskentelytyyppien parantamista järemmillä päällysteillä.

Murtumisajankohdan alkamista pystyttiin säätämään haluttuun suuntaan. Sen sijaan murtumisajanjakson pituuteen ei pystytty riittävästi vaikuttamaan. Jäy-



kempien emulsiopäällysteiden työstettävyyden parantamiseksi voidaan kokeilla murtumisajan pidentämistä seuraavien muuttujien arvoihin vaikuttamalla:

- emulgaattorin/emulgaattorien laatu ja määrä
- emulgaattorin ja tartukkeen määrän suhde
- emulsion pH-arvo
- vesi-bitumi-suhde
- emulgoidun bitumin pisarakokojakauma

Työstettävyyttä voidaan parantaa myös lisäämällä sideaineeseen liuottimia esim. 1... 2%. Myös stabilaattorin käyttö on mahdollista.

Tavoitteena on, että kylmätekniikalla voitaisiin alkuperäisen suunnitelman mukaisesti valmistaa PAB 6000 päällystettä. Kun kiviaines lämmitetään, on tarkoituksena onnistua tekemään uusiomassaa, jonka lisäsideaineena on emulgoitu B-15000. Puhtaaseen kiviainekseen tulisi olla mahdollisuus lisätä vieläkin jäykempää sideainetta, jolloin päällyste on jäykkyydeltään pehmeimpiä asfalttibetoneja vastaava.

## 8.6 Emulsion käyttö SOP:ssa ja SIP:ssä

Bitumiemulsiot eivät ole syrjäyttäneet bitumiliuoksia sorateiden ja sirotepintausten sideaineina. Syynä on ollut tuloksen epävarmuus. Suurin osa emulsioilla tehdyistä SOP:eista on onnistunut hyvin, mutta osa pintauksista on purkautunut. Syytä havaittuihin eroihin ei ole tunnettu.

Pintausten onnistumisen edellytyksenä on riittävä tartunta kiviaineksen ja sideaineen välillä. Koska kiviaines ei ole yhtenäisen bitumikalvon peittämää, pääsee vesi helposti tunkeutumaan sideainekalvon alle. SOP:n ja SIP:n onnistuminen edellyttää päällysteiden tapaan kiviaineksen ja sideaineen välisen tartunnan hallitsemista ja bitumiemulsion valmistamista kiviainekohtaisesti. Pehmeiden päällysteiden vedenkestävyydestä saatavaa tietoa voidaan siten hyödyntää myös pintausten suunnittelussa. Kiviainekselle sopivan bitumiemulsion käyttö ei kuitenkaan yksin riitä varmistamaan hyvää lopputulosta, sillä emulsio voi murtua pesemättömän kiviaineksen pinnalla olevan pölyn vaikutuksesta ennen kuin sideaine ehtii tarttua sirotekiveen. Pintausten onnistumisen varmistaminen edellyttää sekä kiviaineksen pesemistä että kiviainekselle sopivan bitumiemulsion käyttöä. Tavoitteena tulee kuitenkin olla bitumiliuosten korvaaminen pintauksissa bitumiemulsioilla.



## 9. YHTEENVETO

Emulsiopäällysteiden tutkiminen aloitettiin keväällä -92 ja tutkimuksia on jatkettu vuonna -93. Kokemuksia emulsiopäällysteiden tekemisestä ja tutkimisesta on kerätty kahden vuoden ajan. Tutkimukseen on liittynyt poikkeuksellisen laaja koetieohjelma. Kesällä -92 rakennettiin n. 50 koetiekilometriä kuudessa eri tiepiirissä ja kesällä -93 n. 120 kilometriä viiden tiepiirin alueella. Laaja koetieohjelma on mahdollistanut materiaali- ja ympäristömuuttujien vaikutusten selvittämisen sekä kahden erilaisen työmenetelmän vertailun. Laboratoriotutkimusten tarkoituksena on ollut kehittää emulsiopäällysteiden suunnitteluun sopivat esitutkimusmenetelmät, joiden avulla päällysteen oikea suhteitus ja riittävä vedenkestävyys voidaan varmistaa. Lisäksi on seurattu päällysteiden stabiliteettien kehittymistä.

Massoja tehtiin kahdella erilaisella työmenetelmällä. Toisessa sideaine sekoitettiin jakamattomaan kiviainekseen, joka lämmitettiin 40...50 °C lämpötilaan. Toisessa työmenetelmässä käytettiin kahteen lajitteeseen jaettua lämmittämätöntä kiviainesta. Sideaine ruiskutettiin erikseen kumpaankin lajitteeseen. Bitumiemulsio valmistettiin kummassakin työmenetelmässä koneaseman yhteydessä siirrettävällä emulgointilaitteistolla. Annostoimista sekoitusasemaa käytettäessä sideaine emulgoidaan annoskohtaisesti. Suppeasti tutkittiin myös vaihtoehtoa, jossa Neste Oy emulgoi sideaineen, joka toimitettiin valmiina koneasemapaikalle.

Sideaineen emulgoinnilla koneaseman yhteydessä todettiin olevan lukuisia etuja verrattuna emulsion keskitettyyn valmistamiseen jalostamalla. Veden lisääminen vasta koneasemalla säästää kuljetuskustannuksia, koska vettä ei tarvitse kuljettaa pitkiä matkoja. Emulsio valmistetaan vasta juuri ennen käyttöä, joten siltä ei edellytetä varastointikestävyyttä samaan tapaan kuin pitkiä aikoja säilytettävältä ja kaukaa kuljetettavalta emulsiolta. Kun bitumiemulsiota valmistetaan pienissä erissä, on jokaisen erän ominaisuuksia mahdollisuus säätää mahdollisimman hyvin käytettävälle kiviainekselle sopivaksi. Emulgaattorin ja suolahapon määrällä voidaan vaikuttaa emulsion murtumisaikaan ja tarttuvuuteen. Emulsion reseptiä on myös tarvittaessa mahdollisuus muuttaa esim. sään tai massan kuljetusetäisyyden muuttuessa.

Kun emulsiotekniikan käyttö Suomessa yleistyy, tarvitaan muutamia siirrettäviä emulgointilaitteistoja, jos pehmeiden päällysteiden käytön laajuus ei nykyisestä muutu. Annoskohtaisen emulsionvalmistuksen etuna on mahdollisuus reagoida nopeasti muuttuviin oloihin. Emulgointilaitteistoa ei tarvitse hankkia jokaisen koneaseman yhteyteen, sillä laitteiston kapasiteetti riittää ainakin kahden koneaseman palvelemiseen. Jos sideaine emulgoidaan samalla laitteistolla useammalle koneasemalle kuljetettavaksi, tarvitaan emulgointilait-

teiston toimintaperiaatteesta riippumatta varastosäiliö emulsion välivarastointiin, eikä emulsion ominaisuuksia ole mahdollisuutta muuttaa nopeasti. Koh-teissa, joissa kuljetusetäisyys jalostamolta on lyhyt, saattaa valmiiksi emul-goidun sideaineen käyttö olla taloudellinen vaihtoehto.

Molemmat tutkitut työmenetelmät osoittautuivat mahdollisiksi käyttää pehmei-tä emulsiopäällysteitä valmistettaessa. Kummallakin sekoitusmenetelmällä voidaan massa valmistaa joko kylmänä tai lämpimänä, vaikka tehtyjen kokeilujen puitteissa jatkuvatoimisella asemalla tehtiin ainoastaan kylmiä päällysteitä ja annosmenetelmässä kiviaines useimmiten lämmitettiin. Mene-telmillä oli omat heikkoutensa ja vahvuutensa:

#### SEKOITUS JATKUVATOIMISELLA ASEMALLA:

Jatkuvatoimisella asemalla onnistuttiin ilman kiviaineksen läm-mittämistä saavuttamaan riittävä peittoaste ja massan tasalaa-tuisuus, kun kiviaines oli jaettu kahteen lajitteeseen ja sideaine ruiskutettiin molempiin lajitteisiin erikseen. Lämmitysjärjestelmän puuttuminen yksinkertaistaa koneasemaa ja säästää lämmitys-kustannuksia. Hiekoitukseen on kylmäsekoituksessa syytä varautua. Käytössä olleella levityskalustolla menetelmä sopi huonosti käytettäväksi, kun sideaineen viskositeetti on korkea, yli 5000 mm<sup>2</sup>/s.

#### SEKOITUS ANNOSASEMALLA:

Annosasemalla lämpimänä valmistetusta emulsiopäällystemas-sasta saatiin tasalaatuista ilman kiviaineksen jakamista lajittei-siin. Kiviainesrakeet olivat hyvin peittyneitä. Lämmittäminen edellyttää kiviaineksen lämmitysjärjestelmän ja vaatii energiaa, mutta sallii jäykemmän sideaineen käytön ja mahdollistaa myös pehmeän uusioasfalttibetonin valmistamisen. Kun sideaine valmistetaan annoskohtaisesti, voidaan ympäristömuuttujat ottaa tarkasti ja nopeasti huomioon.

Molemmat työmenetelmät soveltuvat emulsiopäällysteiden tekemiseen. Kylmätekniikka oli koekohteissa parhaimmillaan, kun valmistettiin emulsiosoo-raa (ES 1000...3000) jaetusta kiviaineksesta. Lämmittämisen edut tulivat esille jäykemmillä sideaineilla ja jakamatonta kiviainesta käytettäessä. Vaikka homogeenisen massan sekoittaminen onnistuikin kylmätekniikalla, ilmeni vaikeuksia massan levittämisessä, kun sideaineena oli BE-PAB 6000. Näitä ongelmia ei ollut, kun kiviaines lämmitettiin + 50 °C lämpötilaan.

Monissa kokeilukohteissa ilmenneistä alkuvaikeuksista huolimatta kaikista 18 kokeilukohteesta vain yhdessä päällyste vaurioitui pian päällystämisen jälkeen. Kaikissa muissa kokeilukohteissa koepäällysteet ovat hyväkuntoisia.



Edes tarkoituksella otetut riskit eivät aiheuttaneet päällysteen epäonnistumista. Emulsiopäällysteiden materiaali- ja ympäristömuuttujien arvojen (esim. sideainepitoisuus, sade) vaihtelun sietokyky on kokemusten perusteella suurempi kuin öljysoralla. Päällystyskaudella -92 tehdyt emulsiopäällysteet säilyivät hyväkuntoisina myös talven yli.

Laboratoriotutkimusten tarkoituksena oli kehittää emulsiopäällysteiden ennakotutkimiseen sekä työmaan ohjaukseen ja laadunvalvontaan soveltuvat tutkimusmenetelmät. Keskeisiä suunnittelussa tarvittavia esitutkimuksista saatavia tietoja ovat suhteituksessa määritettävä optimisideainepitoisuus ja vedenkestävyys käytettävällä kiviaineksella. Suhteitus tehtiin koekappaleesta mitattujen tilavuussuhdetietojen perusteella. Sideainepitoisuuden määrää kiviaineksessa oleva tyhjätila, josta tietty tilavuusosa täytetään sideaineella. Pehmeille päällysteille käytetty suhteitusmenettely soveltuu tietyin tarkennuksin hyvin myös emulsiopäällysteillä käytettäväksi.

Koneasemapaikkaa vaihdettaessa ilmeni uuden kiviaineksen ja sideaineen välisessä tarttuvuudessa usein ongelmia. Nämä ongelmat saatiin hallintaan emulsion ominaisuuksia säätämällä. Pehmeiden emulsiopäällysteiden yleistyksessä on tärkeää, että tarttuvuusongelma saadaan esitutkimuksin hallintaan. Kiviaineksen ja sideaineen väliseen tartuntaan vaikuttavien seikkojen tunteminen on tarpeen, kun sideaine valmistetaan kiviainekohtaisesti. Luotettavan vedenkestävyyskokeen löytäminen onkin pehmeiden emulsiopäällysteiden jatkotutkimusten tärkein tavoite.

Öljysoran kaltainen vähäliikenteisille teille soveltuva emulsiopäällyste on emulsiosora (ES), jolla on seuraavat ominaisuudet:

- karhittavuus
- varastoitavuus
- ei sisällä liuottimia
- sopii valmistettavaksi myös kylmänä
- sietää jonkin verran alustan kantavuuspuutteita
- stabiliteetin nopea kasvu vähentää vaurioitumista tuoreena

Tiettyä edellä mainittua ominaisuutta voidaan painottaa sideaineen viskositeettivalinnalla. Kun varastoitavuutta ja karhittavuutta pidetään erityisen tärkeinä, valitaan sideaineeksi pehmeä BE-ES 1000...1500. Kulutuskestävyyttä voidaan parantaa ja deformatiivisuuden vaaraa vähentää käyttämällä jäykempää emulsiosoraa ES 3000.

Tutkimuksessa on saavutettu sille asetetut tavoitteet öljysoraa korvaavien emulsiopäällysteiden osalta. Emulsiosoran tekemisessä ei ole työteknisiä ongelmia. Saatujen kokemusten perusteella sitä voidaan ryhtyä käyttämään öljysoran rinnalla. Emulsiosoran yleistymiseen vaikuttaa sen hinnan kilpailuky-



ky öljysoran kanssa ja emulgointilaitteistojen yleistyminen Suomessa.

Toinen kokeilupäällyste oli pehmeä emulsioasfalttibetoni (PAB). Sen tekeminen lämpimänä onnistui hyvin, mutta saatu etu tavalliseen PAB:iin verrattuna on pieni. Emulsiotekniikka mahdollistaa kuitenkin alhaisemman massan sekoituslämpötilan käyttämisen, mikä poistaa pölyongelman ilman erillisiä pölyerotimia. Kylmätekniikkaa käytettäessä massan sekoitus onnistui hyvin, mutta massa oli liian jäykkää levitettäväksi ja tiivistettäväksi. Murtumisajan säätämisen tarkka hallinta on kylmän pehmeän emulsioasfalttibetonin käytön yleistymisen edellytys.

Uusiopäällysteiden käytön lisääntyessä pidettiin tärkeänä myös emulsiotekniikan soveltumista uusiopäällysteiden valmistamiseen. Kokeiluissa käytettiin sekä öljysora- että asfalttibetonirouheita. Valmiin uusiopäällysteen jäykkyys määräytyi rouheen ja lisäsideaineena käytetyn bitumiemulsion viskositeetin mukaan. Kaikki uusiopäällysteet tehtiin lämpiminä. Pehmeimpien tehtyjen RC-päällysteiden, uusioemulsiosorien ja -PAB:n tekeminen onnistui kuten puhdasta kiviainesta käytettäessä. Massan työstettävyyden heikkeni merkittävästi, kun käytettiin AB-rouhetta ja lisäsideaineena oli BE-PAB 6000. Tulokset olivat kuitenkin lupaavia, ja rouheen syöttöä parantamalla, murtumisaikaa säätämällä ja parempaa elvytintä käyttämällä työstettävyyden on mahdollista saada tyydyttävälle tasolle. Tasaisuutta voidaan parantaa myös käyttämällä levittimessä tehokkaampaa palkkia.

Emulsiopäällysteiden suunnittelu, esitutkimus, rakentaminen ja tutkiminen kenttälaboratoriossa noudattaa suurelta osin pehmeillä päällysteillä totuttuja tapoja. Tutkimus- ja työmenetelmiä täytyy kuitenkin tarkentaa emulsiopäällysteille sopiviksi. Erityistä huomiota jatkossa tarvitsee emulsiosoran vedenkestävyyden ennakkotutkimuksen ja kenttälaboratorion tutkimusvalmiuksien kehittäminen. Saatujen kokemusten perusteella ei emulsiopäällysteiden kestävyyttä vielä ole mahdollista arvioida. Koeteiden seurannalla saadaan emulsiopäällysteiden käyttömahdollisuuksista runsaasti tietoa jatkossa.

**KIRJALLISUUSLUETTELO**

1. Ginman, M., Emulsiopäällysteiden, öljysoran ja PAB:n päästömittaukset 1993, Neste Oy.
2. Juujärvi, U., Pohjois-Suomen emulsiokoetiet 1993. Tielaitos, Lapin tiepiiri 1994.
3. Nieminen, P., Pylkkänen, K., Päällystekiviainestutkimus osa 1: hienoaineksen laatu. TTKK, Rakennusgeologia, Raportti 15, 1987.
4. Työympäristö asfaltin uudelleenkäytön yhteydessä, Hagforshälsan AB 1990.
5. Vanhatalo, P., Etelä-Suomen emulsiokoetiet 1993. Tielaitoksen selvityksiä 78/1993, Tielaitos1993.

## LIITTEET

1. Emulsiosoran ohjeellinen koostumus
2. Pehmeän emulsioasfalttibetonin ohjeellinen koostumus
3. Prosessikaavio emulsiomassan annostoimisesta sekoitusasemasta
4. Prosessikaavio emulsiomassan jatkuvasekoitteisesta asemasta



# ÖLJYSORA ÖS EMULSIOSORA ES

## KIVIAINES

Murske  
Lajitteet

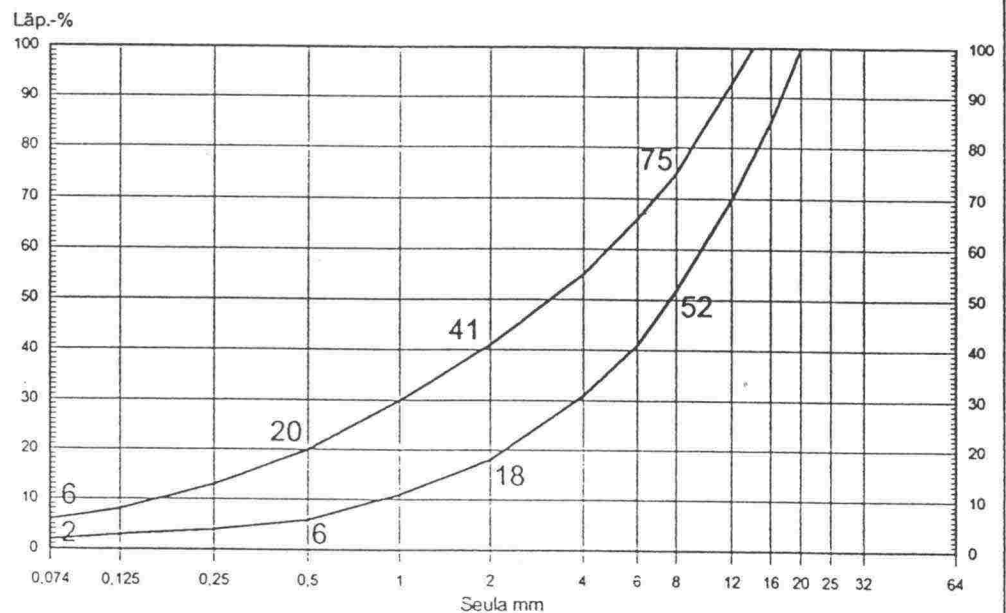
0-12, 0-16 tai 0-20 mm  
0-6 ja 6-16(...20) mm

## SIDEAINE

ÖS: BÖ-2	3,2 - 3,6 %
ES: BE-ES	3,2 - 3,6 % (jäävä sideaine)
B-M1500...B-M3000	3,2 - 3,6 % (jäävä sideaine)

## LISÄAINE

Tartuke: ÖS: esim. mono- ja diamiinin seos 1,2 %  
tai diamiini 0,8 %  
Emulsiota käytettäessä lisätään tartuketta  
bitumipohjaan tarvittaessa  $\leq 0,8$  %



Massamäärä, kun levitys tehdään vakioepaksuisena

yleensä 70 - 100 kg/m<sup>2</sup>

# PEHMEÄ ASFALTTIBETONI PAB

## KIVIAINES

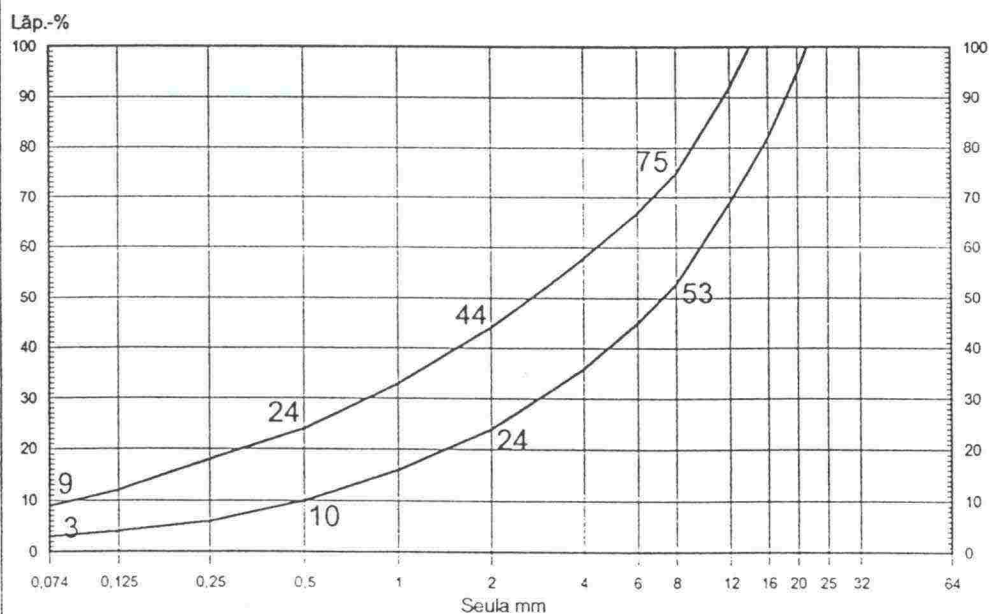
Murske	0-12, 0-16 tai 0-20 mm
Lajitteet	0-6 ja 6-16...20 mm

## SIDEAINE

B-800	3,8 - 4,5 %
BE-PAB	3,8 - 4,5 % (jäävä sideaine)
B-M6000...B-M15000	3,8 - 4,5 % (jäävä sideaine)

## LISÄAINE

Tartuke (tarvittaessa esim. diamiini 0,5 %)  
Emulsiota käytettäessä lisätään tartuketta  
bitumipohjaan tarvittaessa  $\leq 0,6$  %

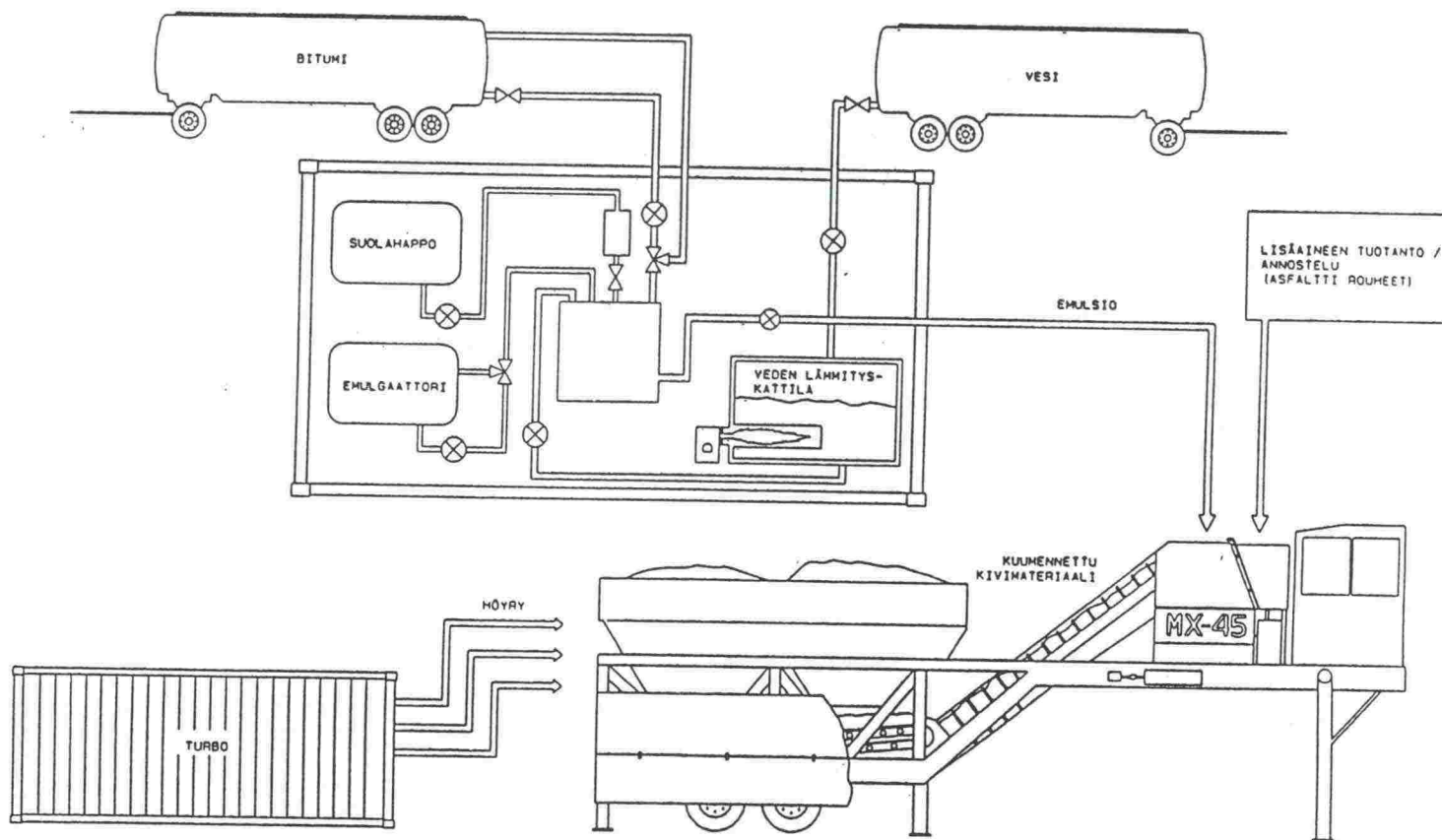


Massamäärä, kun levitys tehdään vakiopaksuisena

yleensä 80-100 kg/m<sup>2</sup>

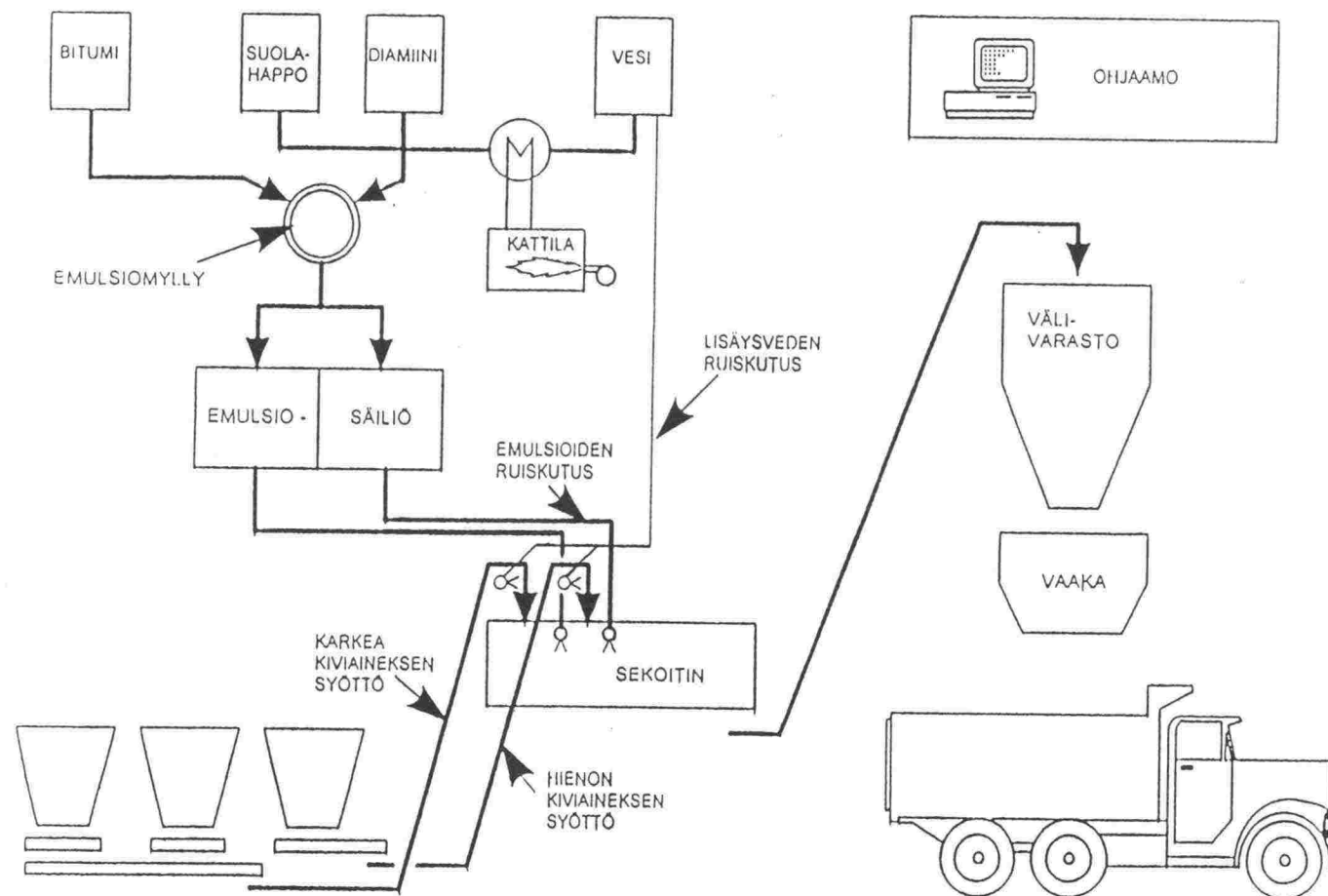
# EMULSIOMASSAN VALMISTUS

Prosessikaavio annostoimisesta  
valmistusmenetelmästä





# PROSESSIKAAVIO EMULSIOMASSAN VALMISTUS JATKUVASEKOITTEISELLA ASEMALLA



## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 55/1993 Valtatie 3, vuoropuhelun arviointi. TIEL 3200180
- 56/1993 Betonipäällysteen valinta ja talous. TIEL 3200181
- 57/1993 Rakennuttamiskulttuuri; I - vaiheen raportti. TIEL 3200182
- 58/1993 Henkilöliikennetutkimus 1992. TIEL 3200183
- 59/1993 Valtatie 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P-Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä-Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 61/1993 Ylistaron keskustateiden suunnittelu asukkaiden näkökulmasta. TIEL 3200186
- 62/1993 Teknologian siirto; Yhteystiedot lähialueyhteistyössä. TIEL 3200187
- 63/1993 Nastallisten ja nastattomien talvirenkaiden pitotutkimus. TIEL 3200188
- 64/1993 Pellon kuivatus tien kohdalla. TIEL 3200189
- 65/1993 Tiesuolan pohjavesivaikutukset - kulkeutumismekanismien moni-ilmiömallinnus. TIEL 3200190
- 66/1993 Kokemuksia Japanin nastattomasta talviliikenteestä. TIEL 3200191
- 67/1993 Liikenneturvallisuus ja suolan käytön vähentäminen; Vällraportti väestön asenteista Kuopion läänin kokeiluun talvikaudella 1992-1993. TIEL 3200192
- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 69/1993 HLFM-maankäyttömalli, esiselvitys. TIEL 3200194
- 70/1993 Kalsiumkloridin käyttö tierakenteessa; Kirjallisuusselvitys ja laboratoriokokeet. TIEL 3200195
- 71/1993 Nonwoven Geotextiles in Road Constructions. TIEL 3200193E
- 72/1993 Yleisten teiden tilaselvitys; Meluntorjunta tiepiireissä. TIEL 3200196
- 73/1993 Valaistus taajamissa; Kuuden kohteen inventointi ja analysointi johtopäätöksineen. TIEL 3200197
- 74/1993 Dynaaminen rasitusindeksi (DRI). TIEL 3200198
- 75/1993 Pientieverkon kunnossapidon kehittäminen. TIEL 3200199
- 76/1993 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus 1992-1993. TIEL 3200200
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201
- 78/1993 Etelä-Suomen emulsiokoetiet 1993. TIEL 3200202
- 79/1993 Emulsiopäällystekokeilut 1992-93. TIEL 3200203